



Science et Systèmes Spatiaux

26 septembre 2017

Cours 2 – Environnement spatial

Hubert Halloin

Qu'est-ce que l'espace ?



- ❖ Pas de définition stricte de la limite entre atmosphère et milieu spatial
 - ❖ Physicien de l'atmosphère : $h \lesssim 80$ km
 - ❖ Ingénieur aéronautique : $h \lesssim 400$ km
- ❖ La limite dépend des critères / de l'utilisation que l'on veut en faire
- ❖ Changements physiques en fonction de l'altitude
 - ❖ Baisse de la pression atmosphérique, raréfaction de l'air
 - ❖ Variations de température
 - ❖ Changement de composition physico-chimique
 - ❖ Modification du spectre / intensité solaire
 - ❖ Modification de l'environnement radiatif (particules chargées)
 - ❖ Variations du champ magnétique
 - ❖ Variation de la gravité

L'atmosphère standard



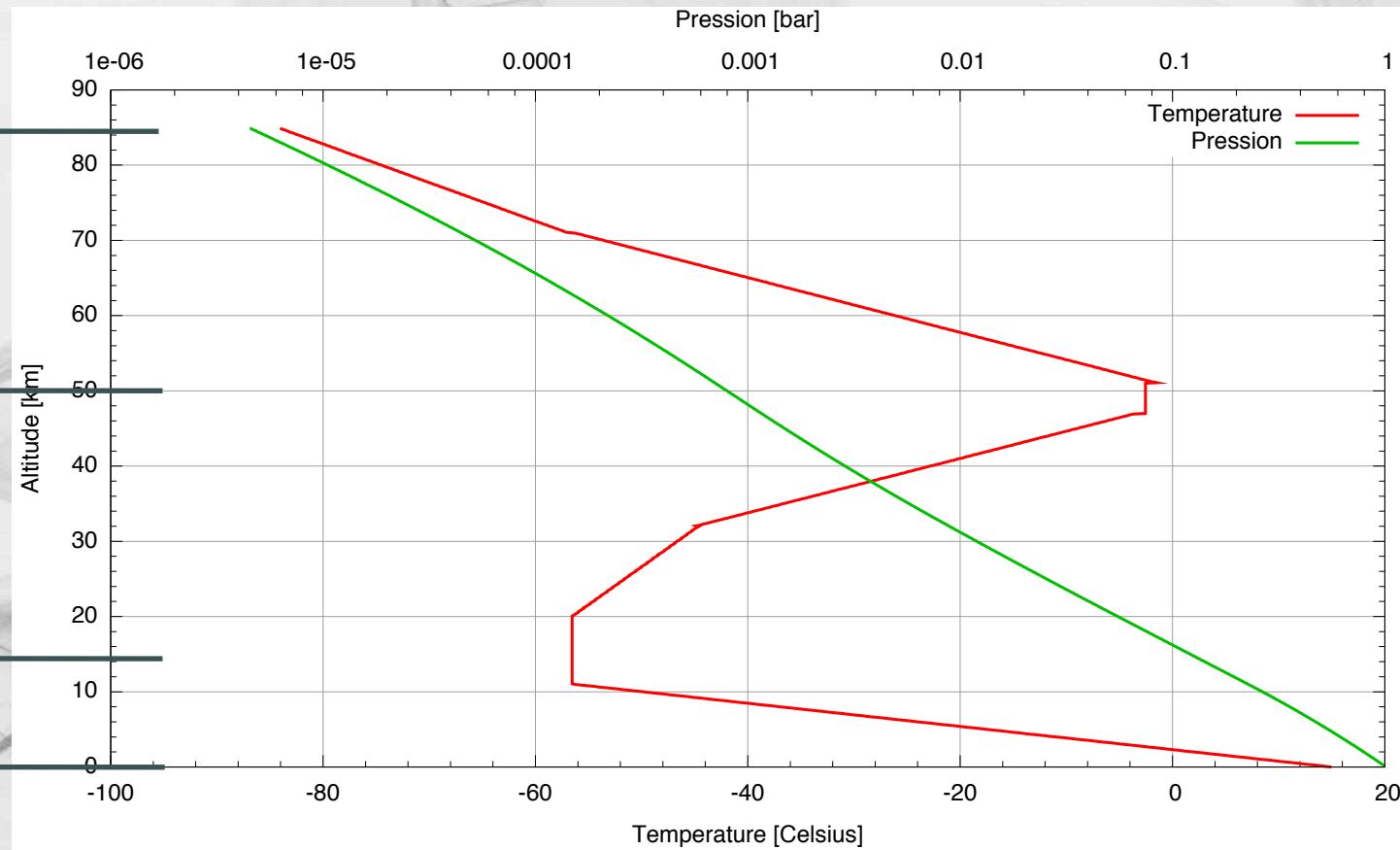
- ❖ En dessous de 90 km (environ) :
 - ❖ Gaz parfait en équilibre hydrostatique
 - ❖ Le libre parcours moyen des molécules est faible et on peut facilement définir la température du milieu (équilibre thermodynamique)
 - ❖ La variation de température est nulle (couche isotherme) ou linéaire en fonction de la température

Thermosphère
Ionosphère

Mésosphère

Stratosphère

Troposphère



L'atmosphère standard



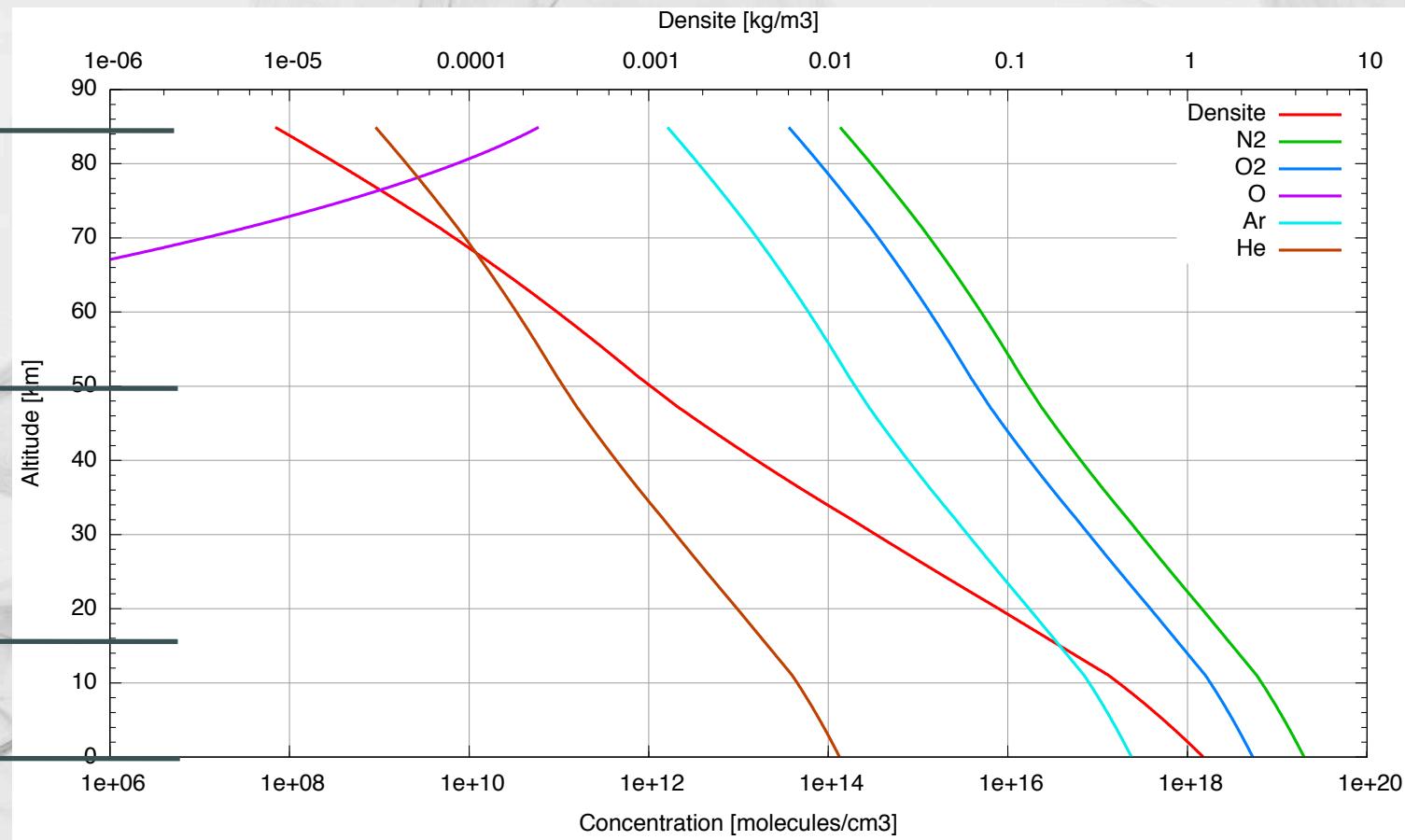
- ❖ En dessous de 90 km (environ) :
 - ❖ Composition : 78% N₂, 21 % O₂, 1% Ar
 - ❖ Le rayonnement UV augmente avec l'altitude et dissocie principalement l'oxygène => création d'oxygène atomique

Thermosphère
Ionosphère

Mésosphère

Stratosphère

Troposphère

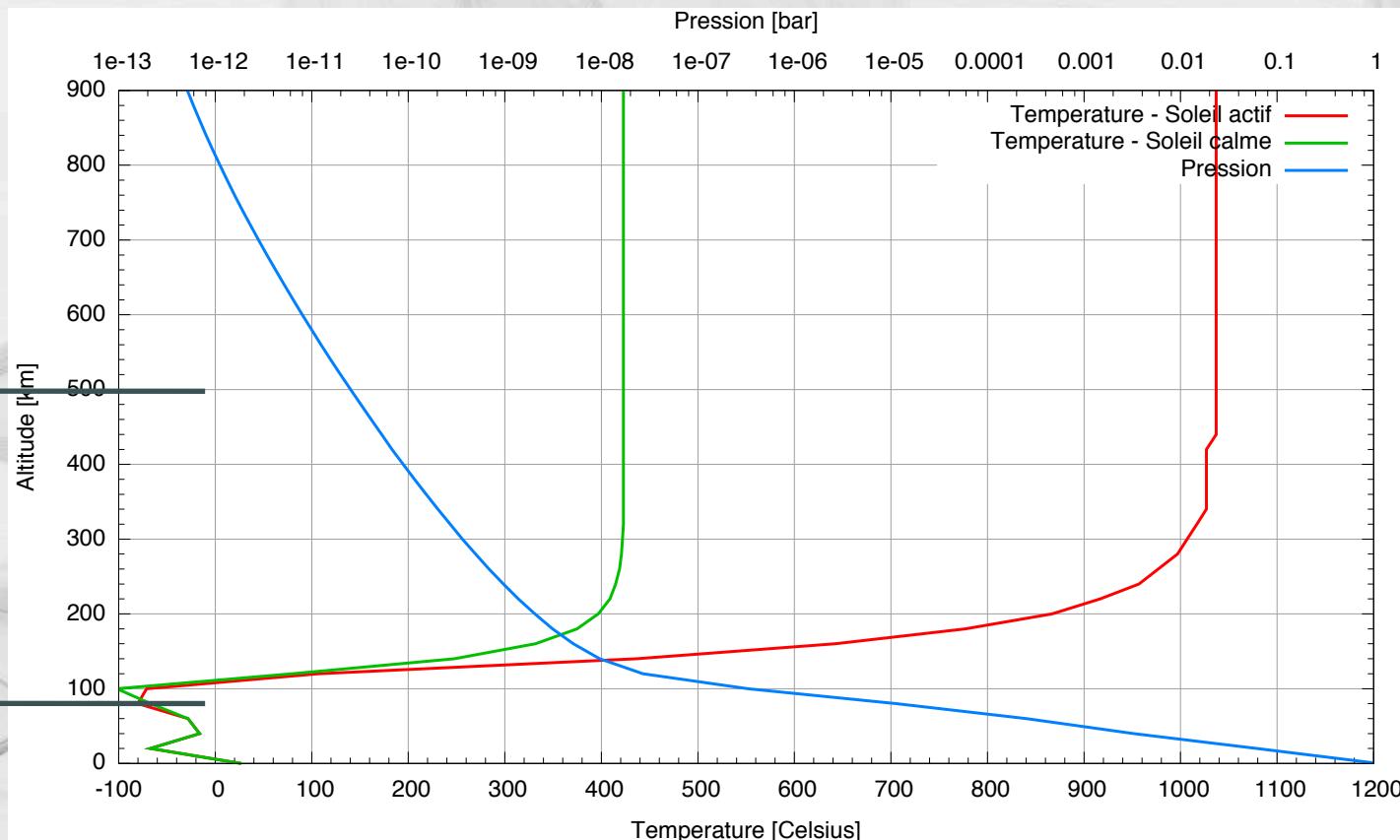


L'atmosphère standard



- ❖ Au dessus de 100 km (environ) :

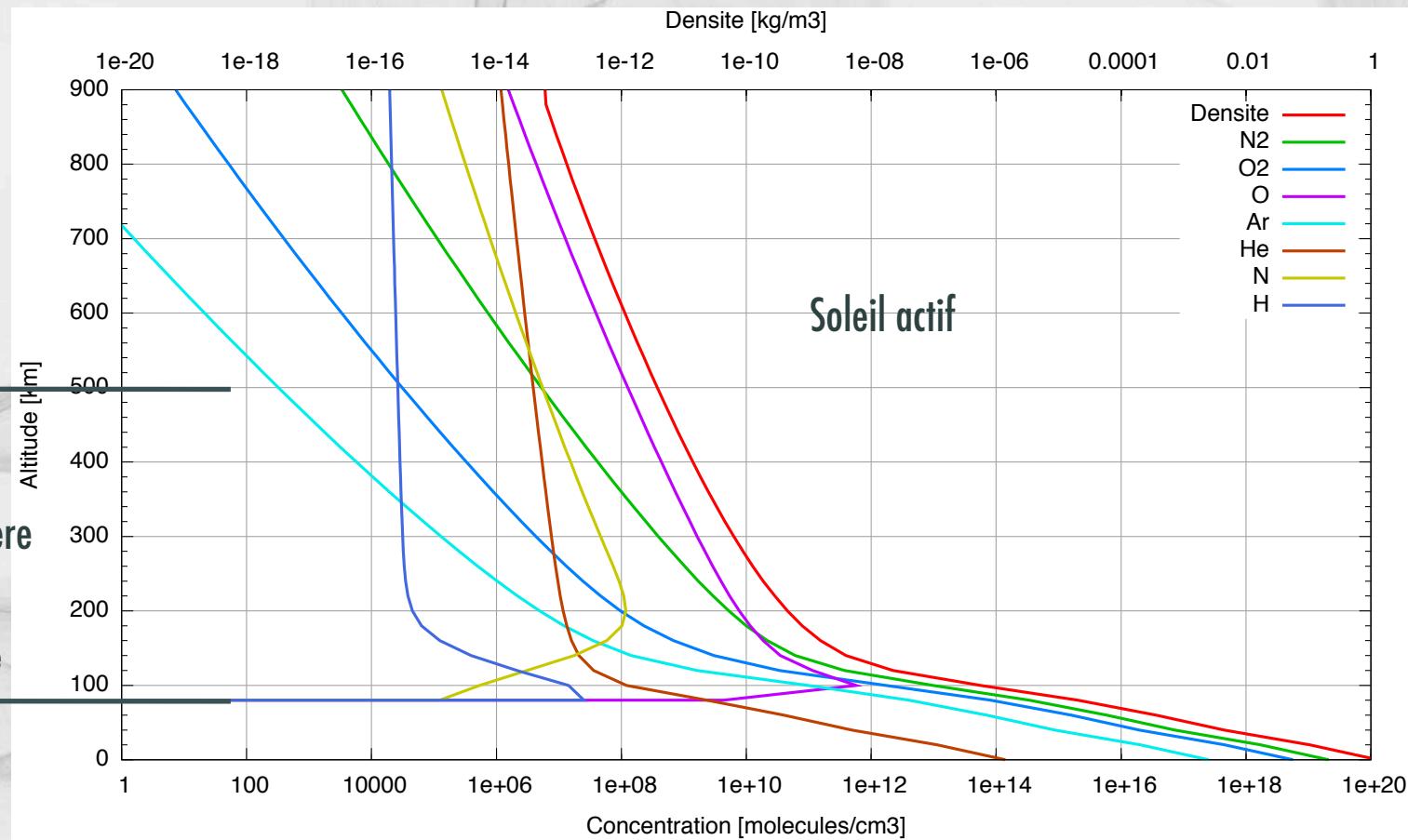
- ❖ Constituants en équilibre diffusif, dont la concentration est régi principalement par la gravité (pas de mélange vertical)
- ❖ Le libre parcours moyen des molécules est grand, l'équilibre thermodynamique n'est pas forcément atteint et on parle alors de température cinétique (i.e. la vitesse moyenne des particules)
- ❖ La variation de température suit (a peu près) une variation exponentielle vers une valeur asymptotique à l'infini, très dépendante de l'activité solaire



L'atmosphère standard



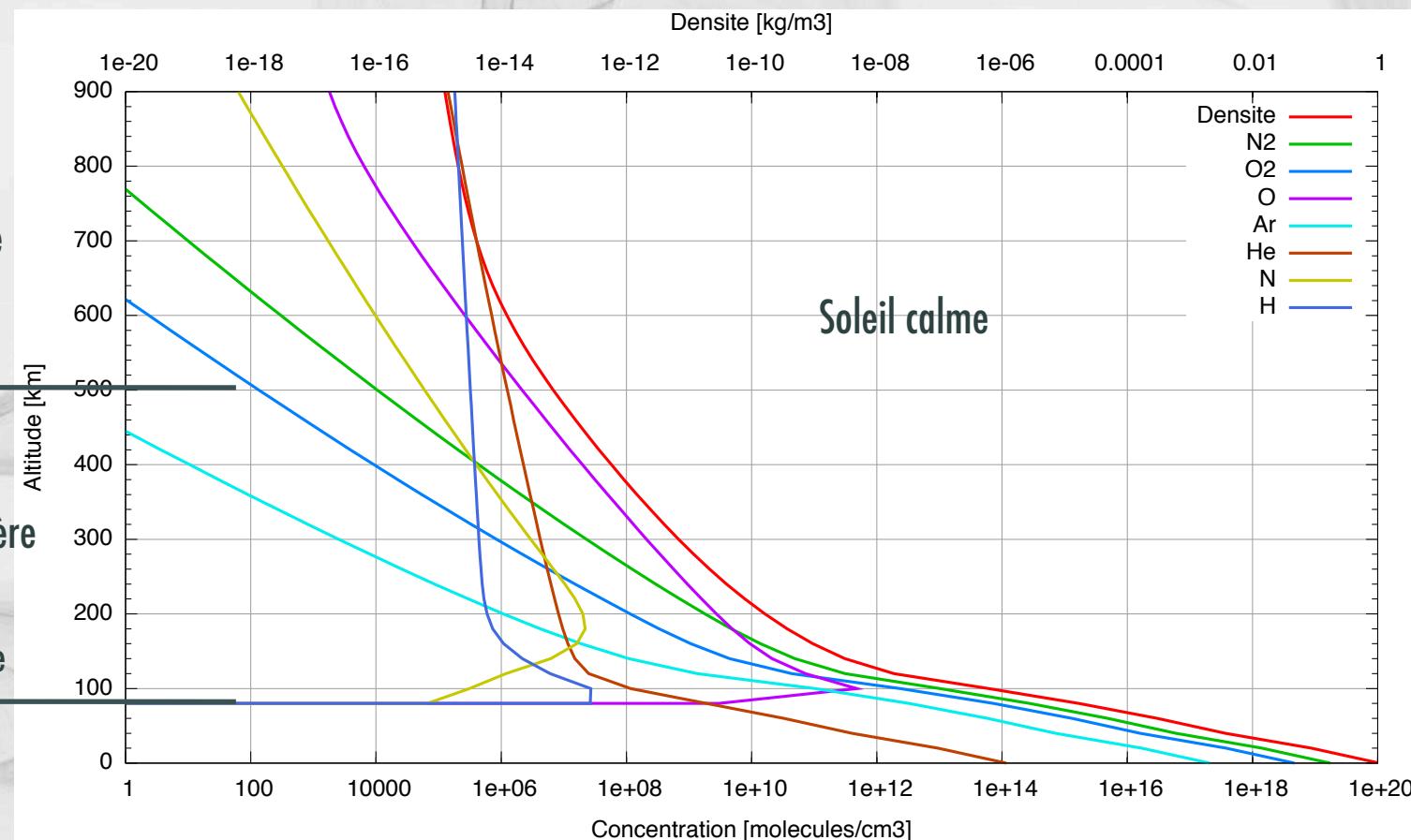
- ❖ Au dessus de 100 km (environ) :
 - ❖ La composition évolue avec l'altitude (photodissociation des molécules de O_2 et de N_2)
 - ❖ Au-dessus de 200 km, l'oxygène atomique devient prépondérant



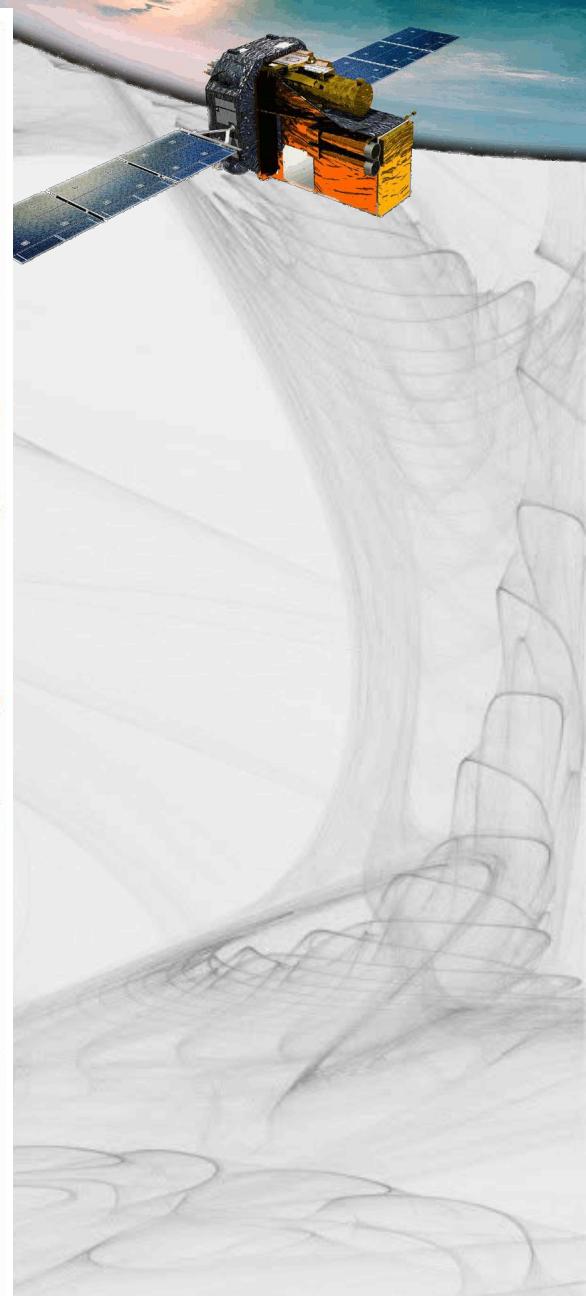
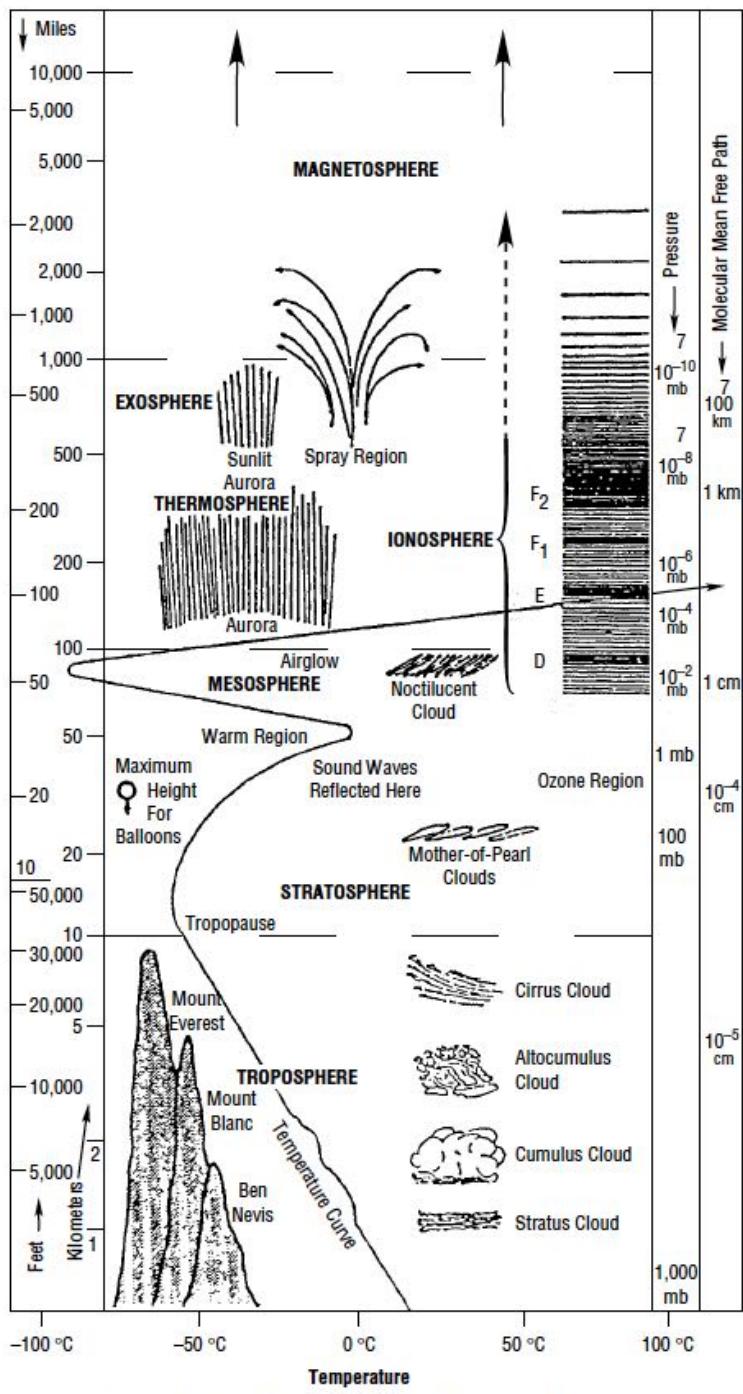
L'atmosphère standard



- ❖ Au dessus de 100 km (environ) :
 - ❖ La composition évolue avec l'altitude (photodissociation des molécules de O_2 et de N_2)
 - ❖ Au-dessus de 200 km, l'oxygène atomique devient prépondérant



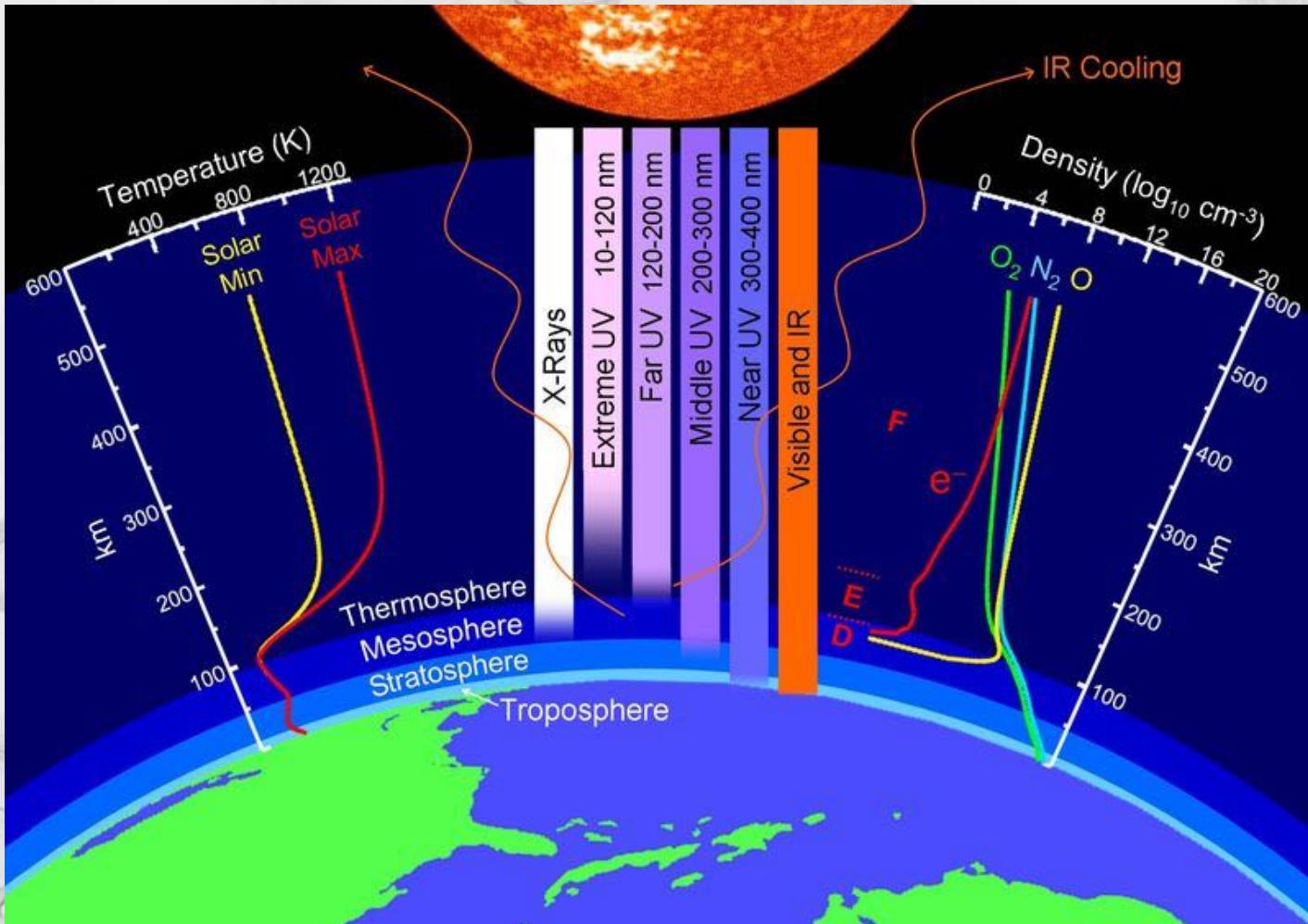
Atmosp



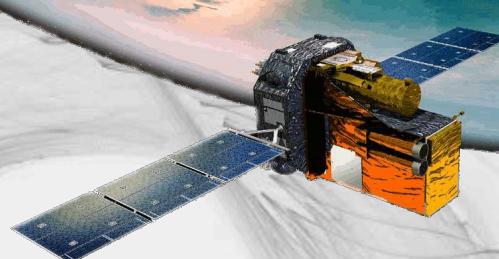
L'atmosphère standard



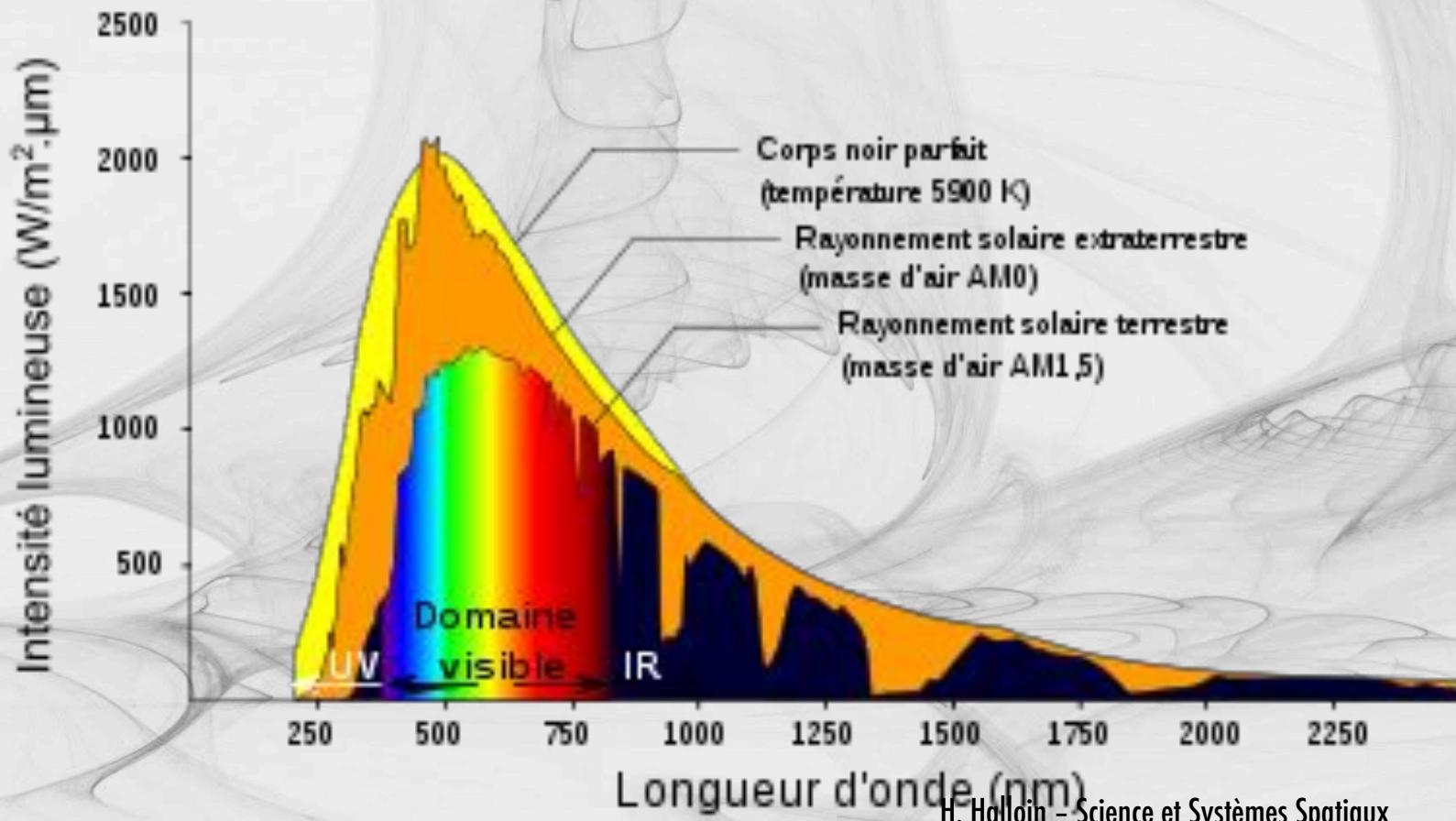
- ❖ Au dessus de 100 km (environ) : spectre solaire total



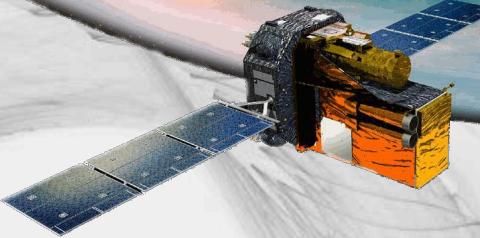
Spectres solaires



- ❖ Flux solaire moyen au-dessus de l'atmosphère : 1361 W/m^2
 - ❖ Constante solaire (flux solaire à 1 ua)
- ❖ Flux solaire au sol : 1000 W/m^2



Autres effets du spectre solaire et de l'atmosphère résiduelle



- ❖ Effets des UV :
 - ❖ Rupture dans les chaînes moléculaires (e.g. polymères)
 - ❖ Durcissement des plastiques (fragilisation), centres colorés
 - ❖ Pertes des qualités optiques d'un instrument
 - ❖ Variation des propriétés thermiques
- ❖ Effets de l'oxygène atomique
 - ❖ Pouvoir oxydant renforcé par la vitesse d'impact (environ 8 km/s en LEO)
 - ❖ Décomposition de couches (organiques) de protection (kapton, Mylar, ...)
 - ❖ Variations des propriétés thermiques
 - ❖ Oxydation des soudures et des miroirs en argent
 - ❖ Luminescence (fluorescence rouge) préjudiciable à certains instruments optiques

Ordres de grandeur



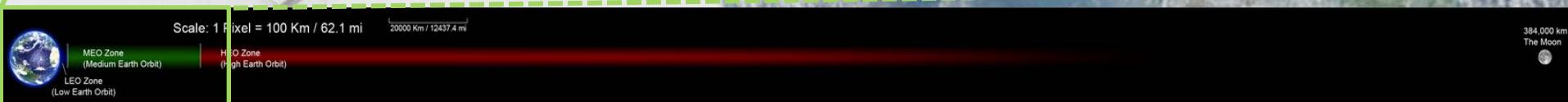
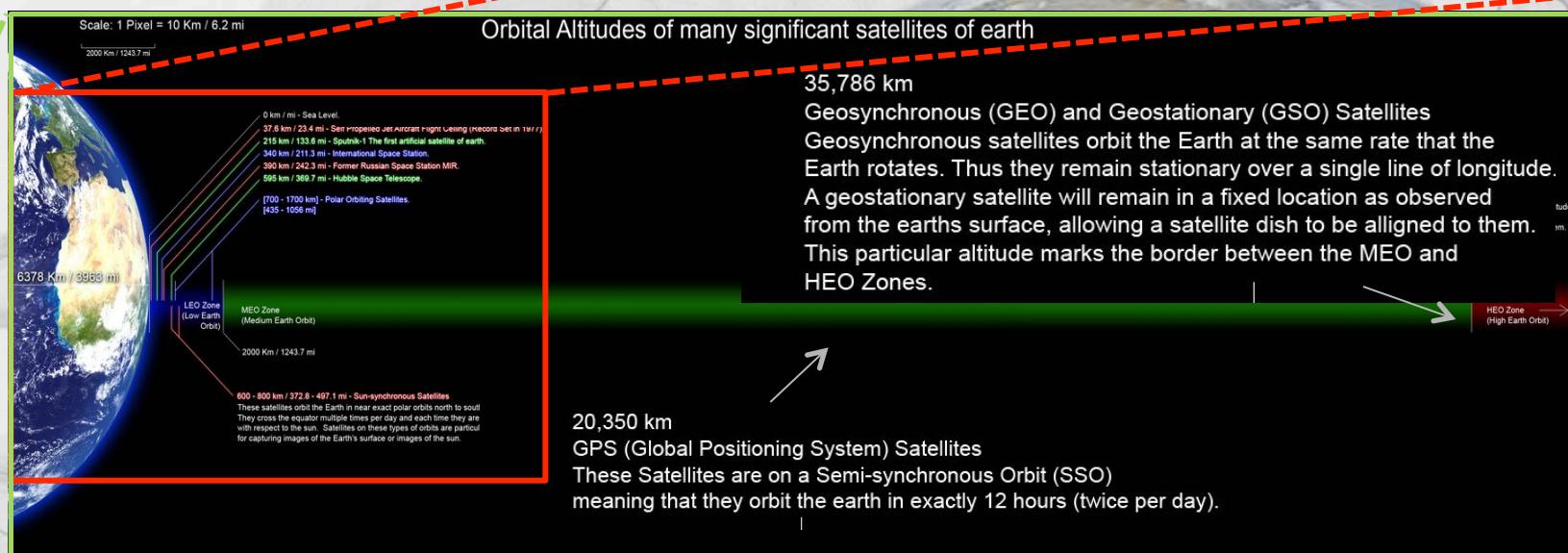
Altitude (km)	Pression (hPa)	Température cinétique (K)	Densité (part/cm3)	Composition	Spectre solaire	Radiations particulières (part/(cm2.s))
0	1013	290	$2,5 \cdot 10^{19}$	78% N ₂ , 21% O ₂ , 1% Ar	Spectre solaire >300 nm + raies absorption	-
30	10	220	$4 \cdot 10^{17}$	N ₂ , O ₂ , Ar	Zone d'absorption	-
200	10^{-6}	400 - 900	10^{10}	N ₂ , O ₂ , O ⁺	Spectre solaire complet	-
800	10^{-9}	400 - 1100	10^6	O, He, O ⁺ , H	Spectre solaire complet	-
6500	10^{-13}	-	10^3	H, H ⁺ , He ⁺	Spectre solaire complet	10^4 p > 35 MeV 10^4 e > 40 keV
2200	$<10^{-13}$	-	10 - 100	85% H ⁺ , 15% He ²⁺	Spectre solaire complet	10^8 p > 5 MeV 10^8 e > 40 keV 10^4 e > 1,6 MeV

- ❖ En physique de l'atmosphère, on considère que l'espace débute à 80 km
- ❖ En astronautique, il commence à environ 200 km ...

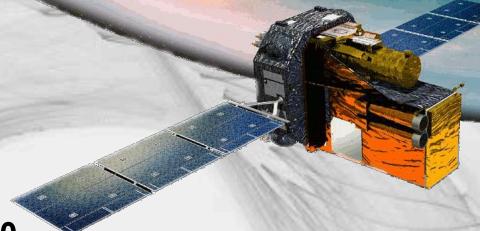
Les différents types d'orbites terrestres



- ❖ LEO (Low Earth Orbit) : 200 - 2 000 km
- ❖ MEO (Medium Earth Orbit) : 2 000 - 36 800 km
- ❖ GEO (Geosynchronous) : 36 800 km
- ❖ HEO (High Earth Orbit) : > 36 800 km



Atmosphère résiduelle

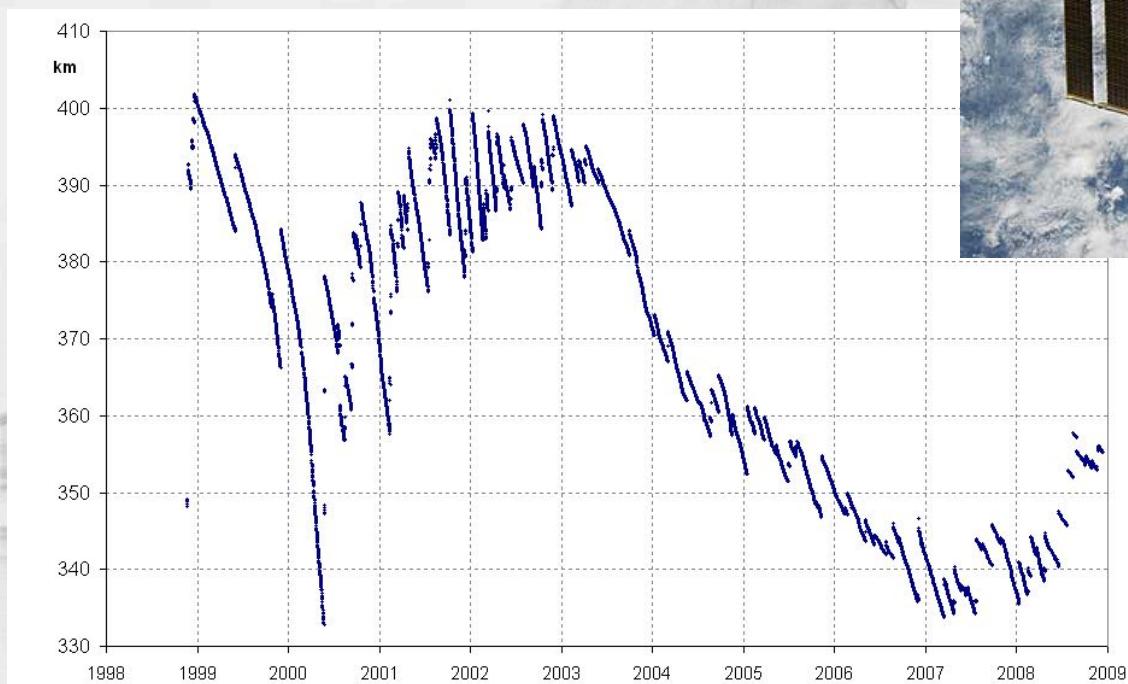


- ❖ Principal effet de l'atmosphère (neutre) résiduel : trainée atmosphérique
 - ❖ Freine les engins spatiaux en orbite basse
 - ❖ Diminue leur durée de vie (rentrée atmosphérique) ou nécessite une compensation active (remontée grâce à des propulseurs)
 - ❖ Circularise l'orbite
- ❖ On modélise cet effet aérodynamique comme pour un avion : une force de trainée, une force de portance
 - ❖ C_x est le coefficient de trainée (toujours >0 , s'oppose à V)
 - ❖ C_z est le coef de portance (positif ou négatif)
 - ❖ $f_x = -\frac{1}{2}\rho SV^2 C_x$; $f_z = \frac{1}{2}\rho SV^2 C_z$
 - ❖ S est la surface de portance (ou de trainée), ρ la densité atmosphérique et V la vitesse de l'engin
 - ❖ C_x et C_z dépendent de la géométrie du satellite, de son attitude, de l'état des surfaces, etc.
 - ❖ Pour un satellite : la portance est généralement négligeable, C_x est de l'ordre de 2 (c.à.d. les performances aérodynamiques d'une brique ...)
 - ❖ Boeing 747 : $C_x \approx 0,03$
- ❖ Durées de vie estimées pour un satellite de 500 kg / $S = 2 \text{ m}^2$, orbite équatoriale circulaire
 - ❖ 300 km : 1 mois
 - ❖ 400 km : 10 mois
 - ❖ 600 km : 25 ans
 - ❖ 800 km : 350 ans ...



Atmosphère résiduelle

- ❖ Remontées régulières de la station spatiale internationale (410 km d'altitude)
 - ❖ Perte d'altitude de ~ 200 m/jour
 - ❖ Remontées régulières (vaisseaux Progress ou ATV) tous les 10 à 45 jours

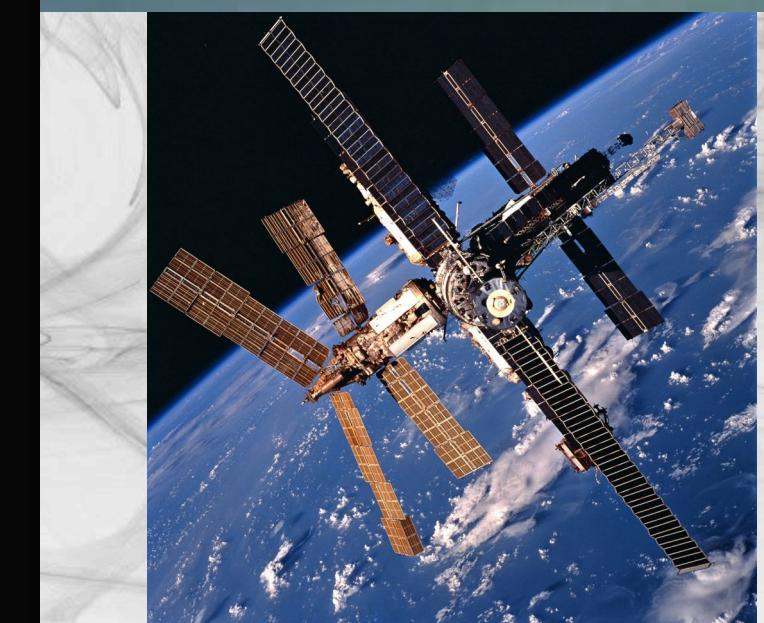


Désintégration atmosphérique

- ❖ Désorbitation de MIR (station spatiale 1986 – 2001)
- ❖ Rentrée du cargo ATV

<https://youtu.be/e20iAk1l2vs>

<https://youtu.be/h902KJb0cfE>

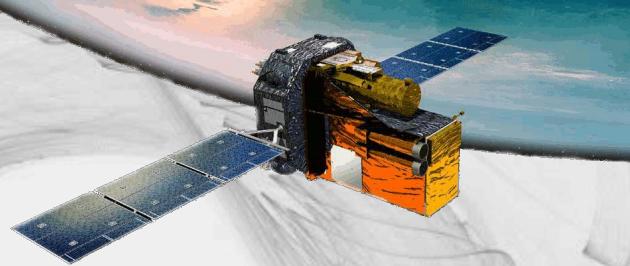


Le vide spatial



- ❖ Au-delà de quelques centaines de km d'altitude, l'espace est **vraiment** vide (moins de 10^{-9} x pression atmosphérique)
- ❖ Quelques effets du vide :
 - ❖ Dégazage des matériaux
 - ❖ Contraintes mécaniques dans les assemblages, colles, composants électroniques (présence de bulles d'air)
 - ❖ Contamination des optiques par les gaz relâchés
 - ❖ Dégazage des surfaces 'chaudes', dépôt sur les surfaces 'froides'
 - ❖ Changement de composition de matériaux 'mous' : graisses, plastiques, etc.
 - ❖ Il faut une sélection fine des matériaux utilisés, par exemple :
 - ❖ Autorisés : la plupart des métaux (aluminium, or, cuivre, ...), peu de plastiques (sauf, p.ex., Kapton, Teflon), les verres et céramiques, quelques colles et lubrifiants techniques
 - ❖ Interdits : quelques métaux (plomb, cadmium, magnésium), la plupart des plastiques, des colles, des lubrifiants et des peintures
 - ❖ Assemblage en atmosphère sèche, propre et sans traces de doigts ...
 - ❖ Adhérence des parois et collage des pièces mécaniques (complexité des dispositifs mécaniques sous vide)
 - ❖ Absence de convection / conduction à l'extérieur du satellite : les seuls échanges thermiques externes sont par radiations
 - ❖ Pas de comburant pour les moteurs => il faut embarquer l'oxydant et le réducteur pour la propulsion chimique

Effets physiologiques du vide



- ❖ Le corps humain est relativement robuste au vide ...
- ❖ Quelques repères :
 - ❖ Pression atmosphérique normale : 1013 hPa (20% O₂+ 80 % N₂)
 - ❖ Pression minimale d'oxygène pure : 250 hPa (133 hPa O₂, 53 hPa CO₂, 63 hPa H₂O)
 - ❖ Seuil de troubles (hypoxie) : 200 hPa
 - ❖ Pression de vapeur saturante @38 °C : 63 hPa
- ❖ Effets d'une exposition au vide :
 - ❖ Refroidissement de la peau et 'brûlures' superficielles par ébullition de l'eau
 - ❖ Les vaisseaux sanguins maintiennent la pression interne au-dessus du seuil d'ébullition
 - ❖ Désoxygénéation des tissus, augmentation du volume du corps : perte de conscience en ~ 10s
 - ❖ Chute de la pression artérielle et arrêt de la circulation sanguine
 - ❖ La survie nécessite une recompression à 270 hPa en 60 à 90 s.
 - ❖ Et le spationaute ne doit pas retenir son souffle (rupture interne des poumons ...)

Effets physiologiques du vide



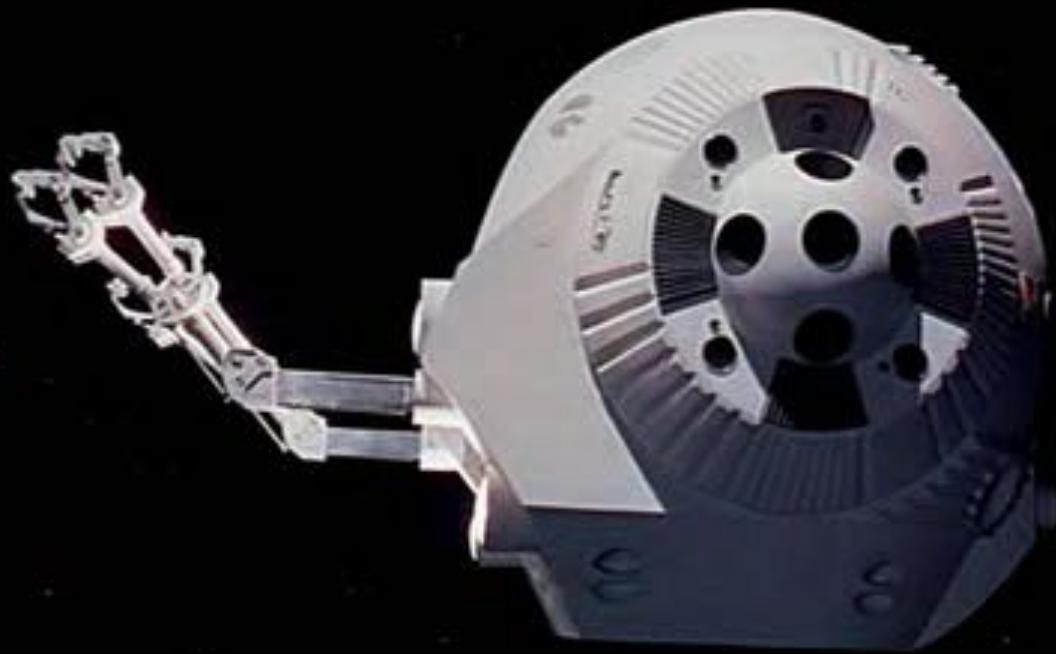
- ❖ Peu d'expériences 'réelles' sur des hommes ...
 - ❖ En 1960, lors d'un vol ballon à très haute altitude (31 km), J. Kittinger a perdu la pressurisation dans un de ces gants => paralysie et perte momentanée de l'usage de sa main (récupération après quelques heures à pression normale)
 - ❖ Le 30 juin 1971, la capsule Soyuz 11 se dépressurise accidentellement lors de sa rentrée atmosphérique à 168 km d'altitude. Les 3 cosmonautes (Dobrovolsky, Volkov, Patsayev) à bord meurent d'asphyxie
 - ❖ Soyuz sera redessinée pour que les cosmonautes portent des combinaisons spatiales légères (en cas d'urgence)
 - ❖ Les seuls morts dans l'espace de l'histoire de la conquête spatiale
 - ❖ Jim LeBlanc subit une dépressurisation accidentelle lors d'un test de scaphandre en 1965 (pas de séquelles) :



Effets physiologiques du vide



- ❖ Situation souvent aberrante dans les films de SF (explosion, congélation immédiate, etc.)
- ❖ La vision de Stanley Kubrick est, par contre, assez correcte (2001, l'Odyssée de l'Espace) :

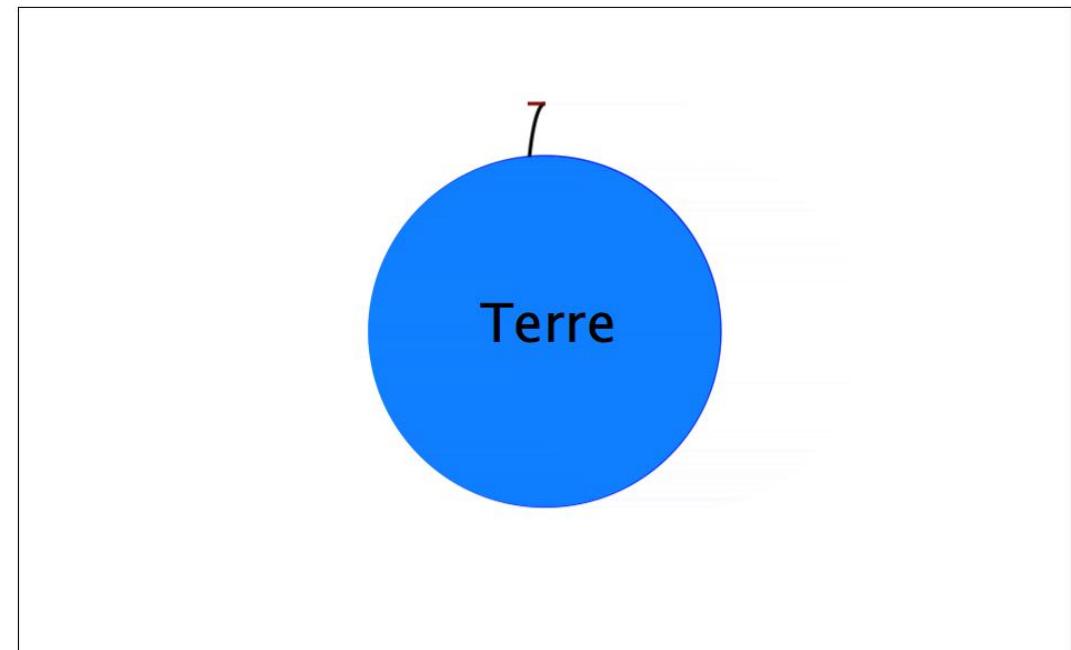
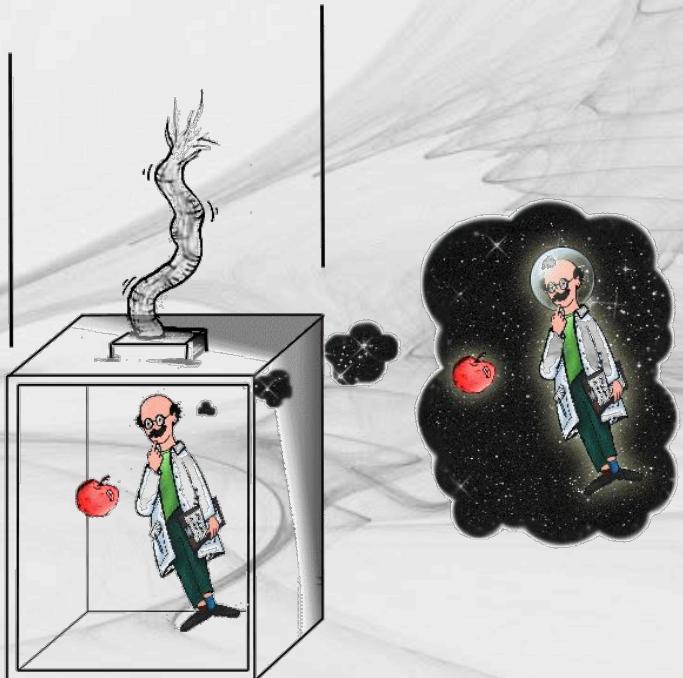


Apesanteur ou impesanteur



Impesanteur ou apesanteur

- ❖ Impesanteur permet d'éviter la confusion « la pesanteur » / « l'apesanteur »
- ❖ Les 2 signifient « absence de pesanteur », ce qui est faux : la force de gravitation est évidemment toujours présente...
- ❖ Un objet en 'impesanteur' est un objet en « chute libre » : rien ne s'oppose à la force gravitationnelle et tous les corps suivent donc la même trajectoire (équivalence masse grave et masse inerte)
- ❖ Un ascenseur en chute libre, un satellite en orbite et un vaisseau interplanétaire (sans propulsion...) sont en impesanteur
- ❖ Un satellite en orbite est un objet qui chute mais rate toujours la Terre
 - ❖ Base de l'intuition de Newton entre la pomme et la Lune



Apesanteur ou impesanteur



- ❖ Effets de l'impesanteur
 - ❖ Plus de poids, mais toujours de l'inertie
 - ❖ Plus de poussée d'Archimède
 - ❖ Pas de sédimentation
 - ❖ Pas de convection naturelle
 - ❖ Modification des interfaces : capillarité, mouillage, tension superficielles
- ❖ En l'absence de gravité des phénomènes de 2nd ordre sont observables :
 - ❖ Le mouvement brownien (lié à la température)
 - ❖ Les forces de Lorentz (champs E et B)
 - ❖ La pression acoustique
 - ❖ La pression de radiation
 - ❖ Phénomènes de diffusion : gradients de concentration, de champ (B ou E), de température, etc.
 - ❖ ...
- ❖ Des expériences en micro-gravité sont menées pour comprendre certains phénomènes de physique :
 - ❖ Croissance cristalline
 - ❖ Combustion
 - ❖ Formation de congolomérats homogènes

Apesanteur ou impesanteur

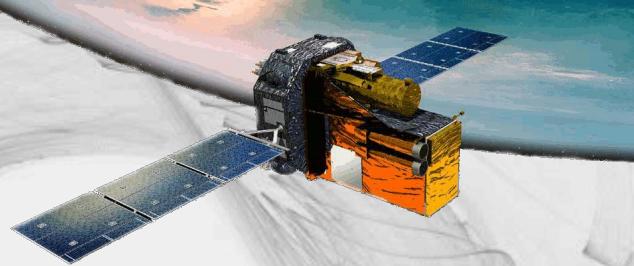


❖ Combustion en impesanteur

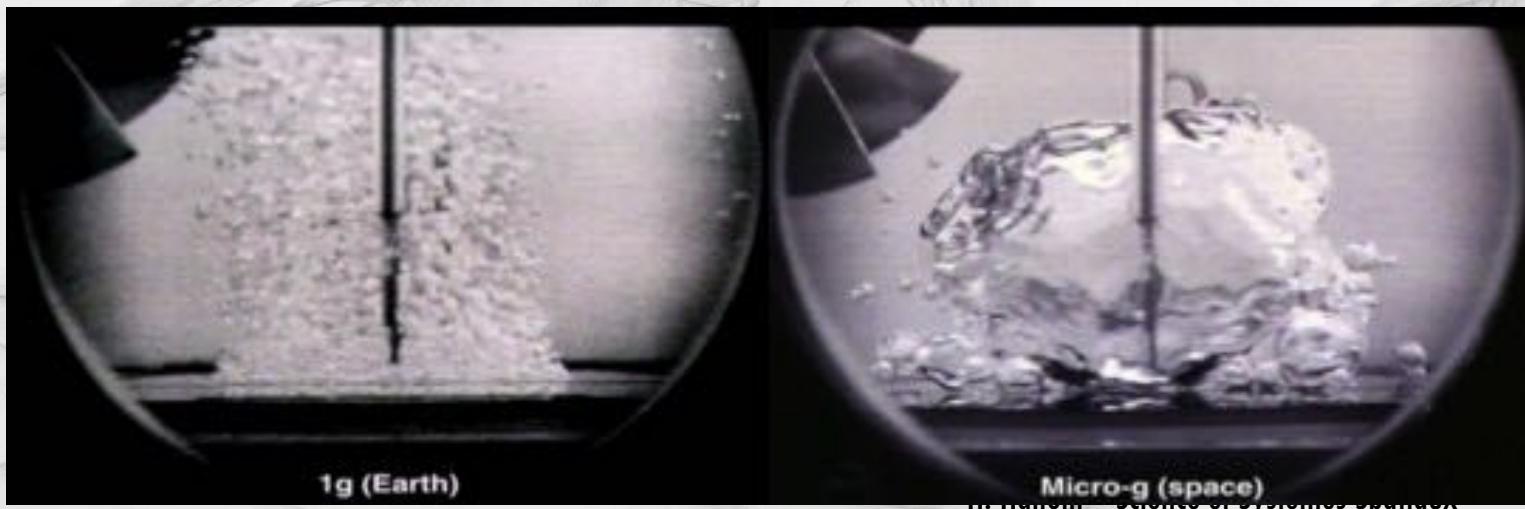
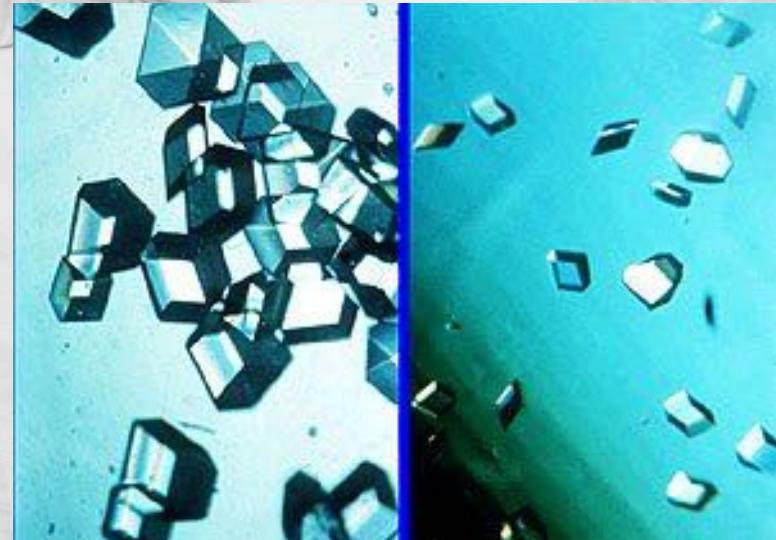
https://youtu.be/DKxAs_f1SP8



Apesanteur ou impesanteur



- ❖ Eau bouillante en apesanteur
- ❖ Croissance cristalline



Apesanteur ou impesanteur



❖ Tension de surface et capillarité

<https://youtu.be/pk7Lcug03zg>

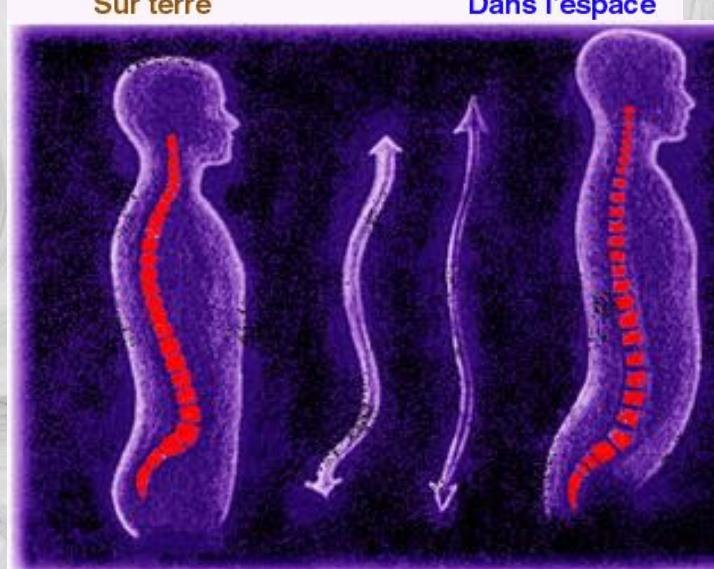
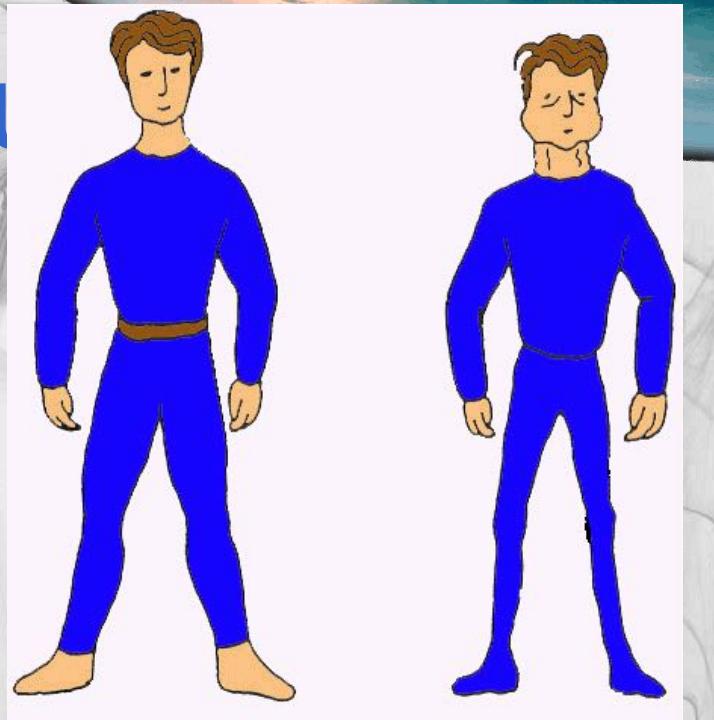
<https://youtu.be/3drccE-0lnc>



Apesanteur ou impesanteur

- ❖ Effets biologiques de l'impesanteur
 - ❖ Absence de pression hydrostatique => remontée des fluides sanguins
 - ❖ Mal de l'espace : nausées, étourdissements, désorientation
 - ❖ Atrophie musculaire
 - ❖ Elongation de la colonne, pertes osseuses
- ❖ Une ré-adaptation physique est nécessaire au retour sur Terre

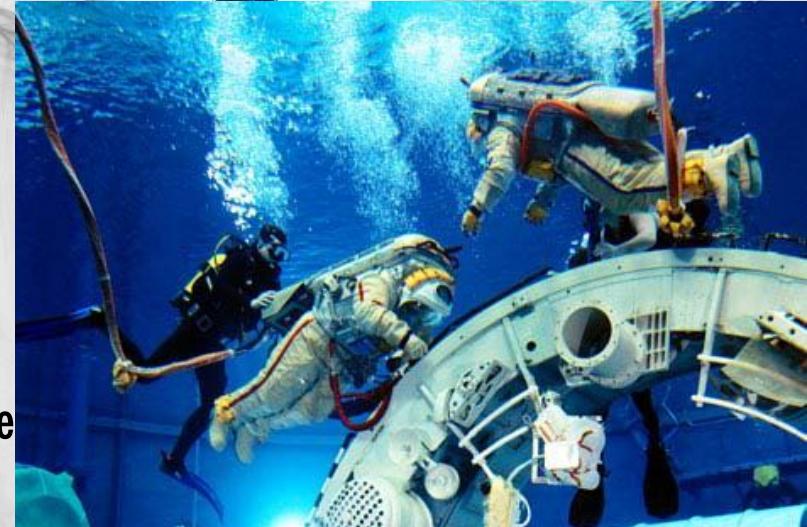
<http://dai.ly/xi2riv>



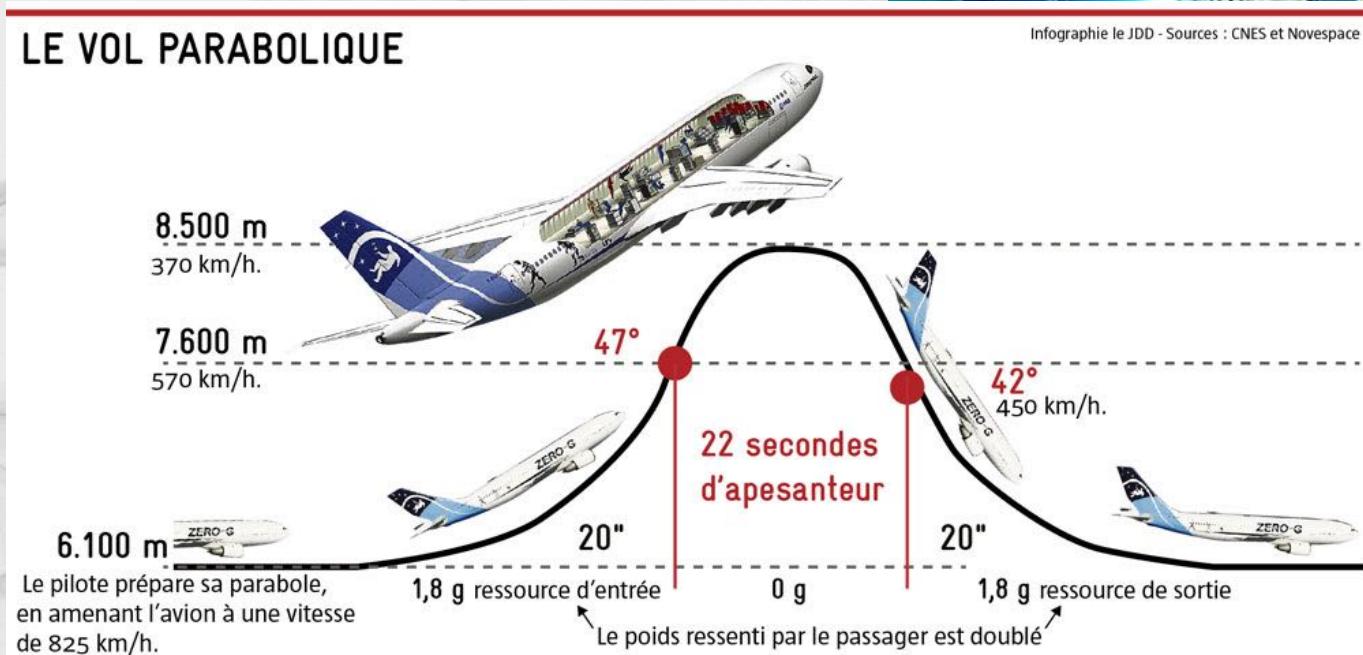
Pendant un vol spatial, la colonne vertébrale d'une personne peut s'allonger de plus de sept centimètres en l'absence de pesanteur.

Apesanteur ou impesanteur

- ❖ Peut-on simuler l'impesanteur sur Terre ?
- ❖ Vols zéro-G
- ❖ Tours de chutes libre
- ❖ Piscine
- ❖ Compensation de la gravité par la poussée d'Archimède mais pas de sensation d'impesanteur => entraînement des astronautes à la manipulation des objets (inertie)



LE VOL PARABOLIQUE



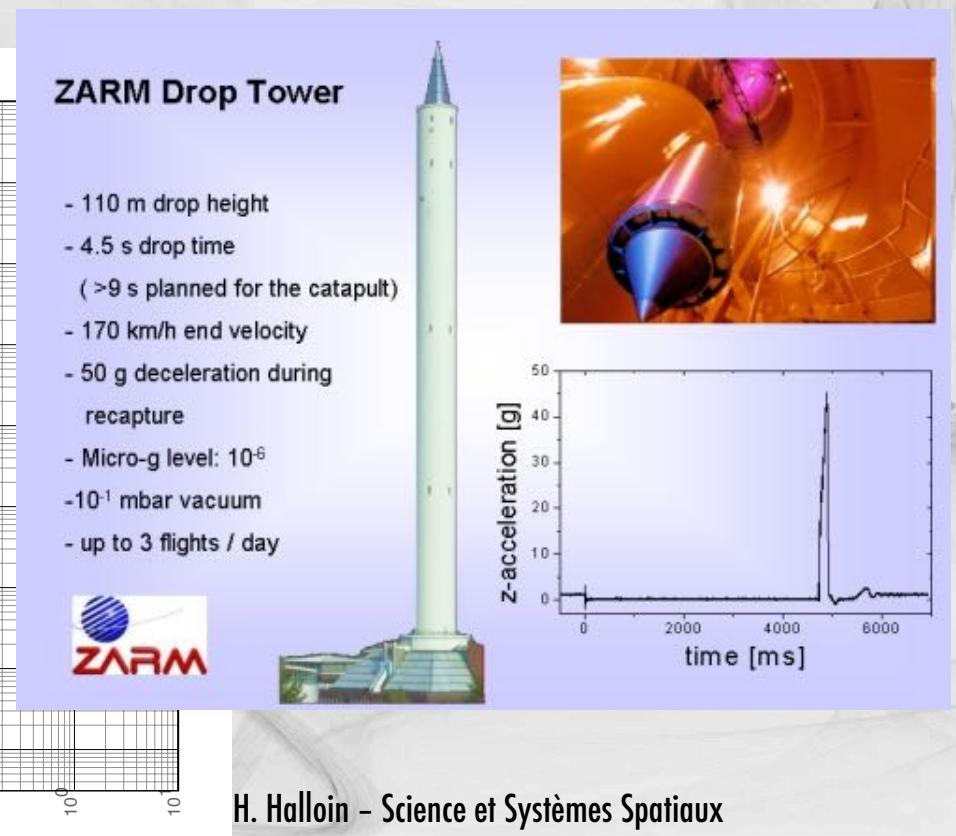
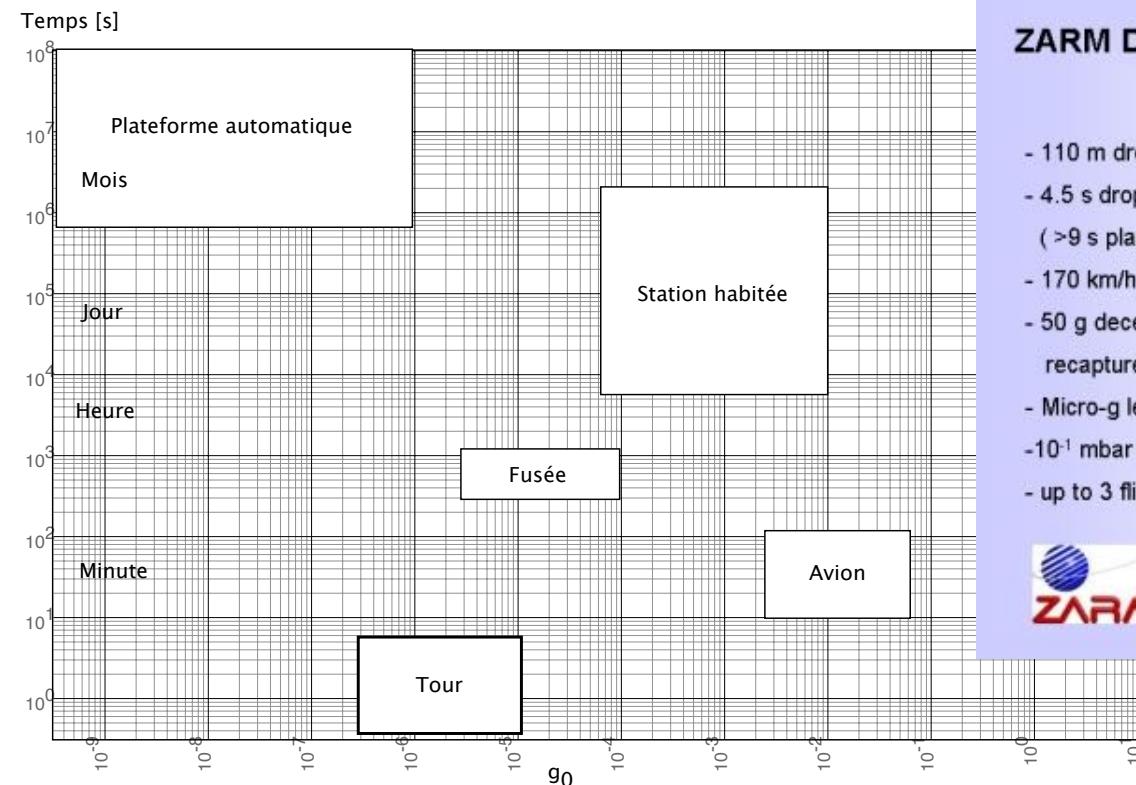
atiaux

Apesanteur ou impesanteur



Peut-on simuler l'impesanteur sur Terre ?

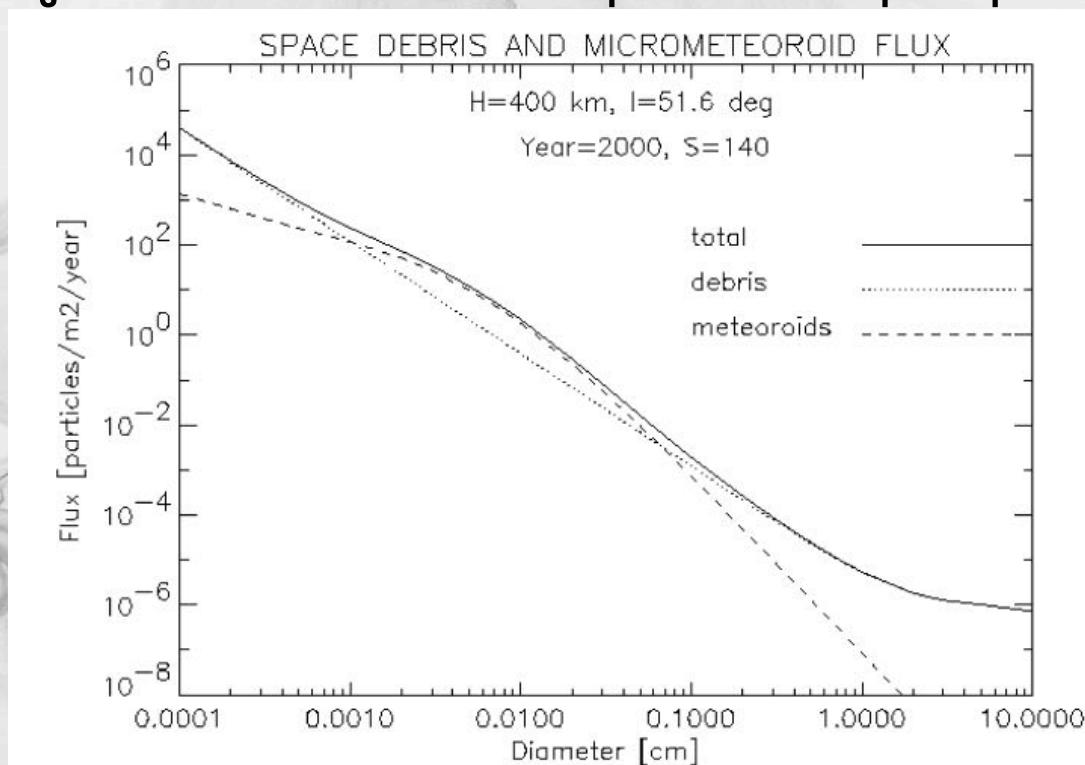
- ❖ Vols zéro-G
- ❖ Tours de chutes libre
- ❖ Piscine
- ❖ Compensation de la gravité par la poussée d'Archimède mais pas de sensation d'impesanteur => entraînement des astronautes à la manipulation des objets (inertie)



Débris et micro-météorites

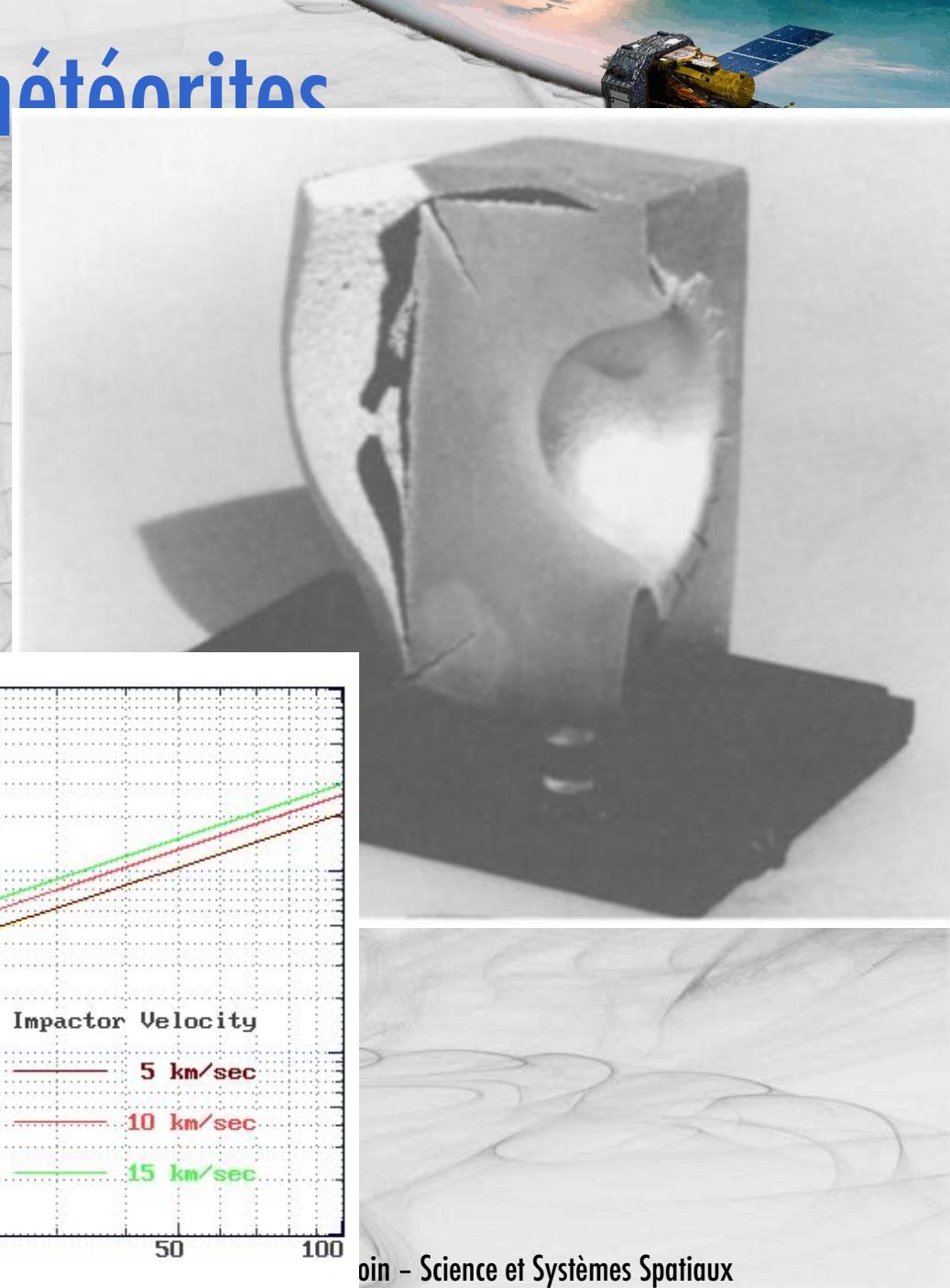
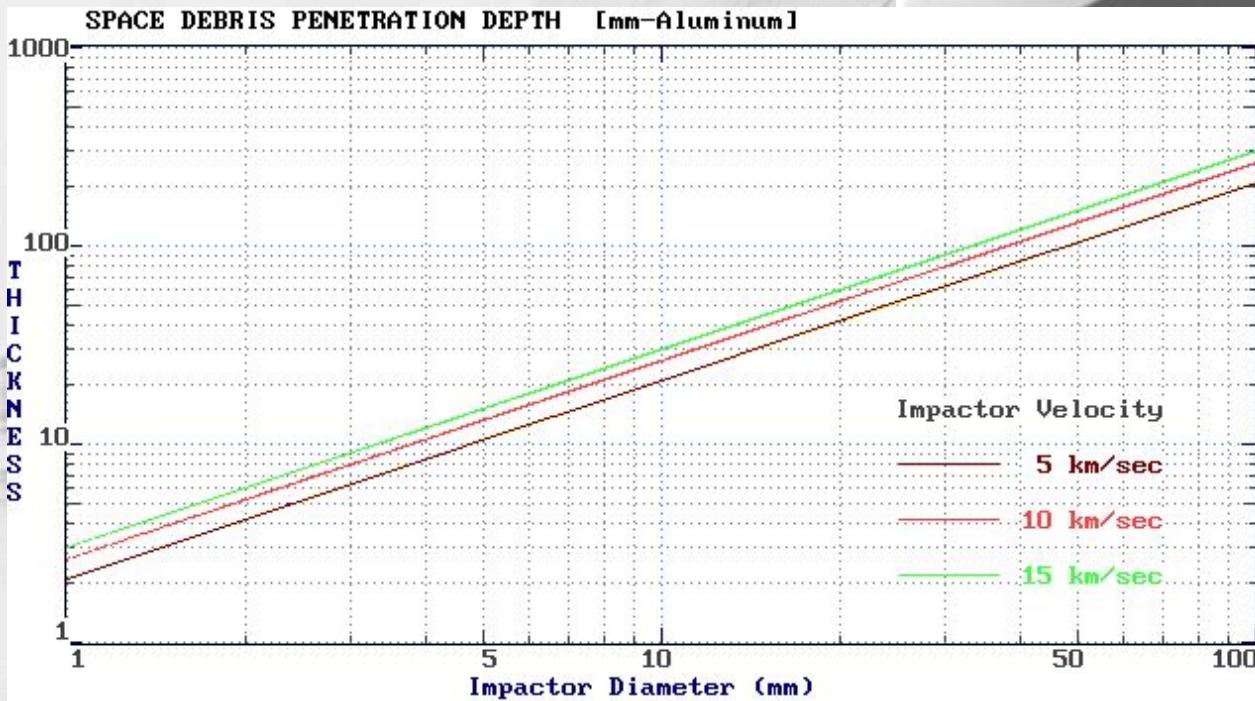


- ❖ Les micrométéorites sont des particules solides (résidus de météorites et comètes généralement) de taille comprise entre quelques microns et quelques mm (poids du ng au mg)
- ❖ Les débris sont issus de l'activité spatiale depuis 1957
- ❖ Au niveau de la Terre, la vitesse relative des satellites et des micrométéorites/débris est de plusieurs dizaines de km/s
- ❖ Ces impacts dégradent la surface des satellites peuvent même provoquer leur destruction



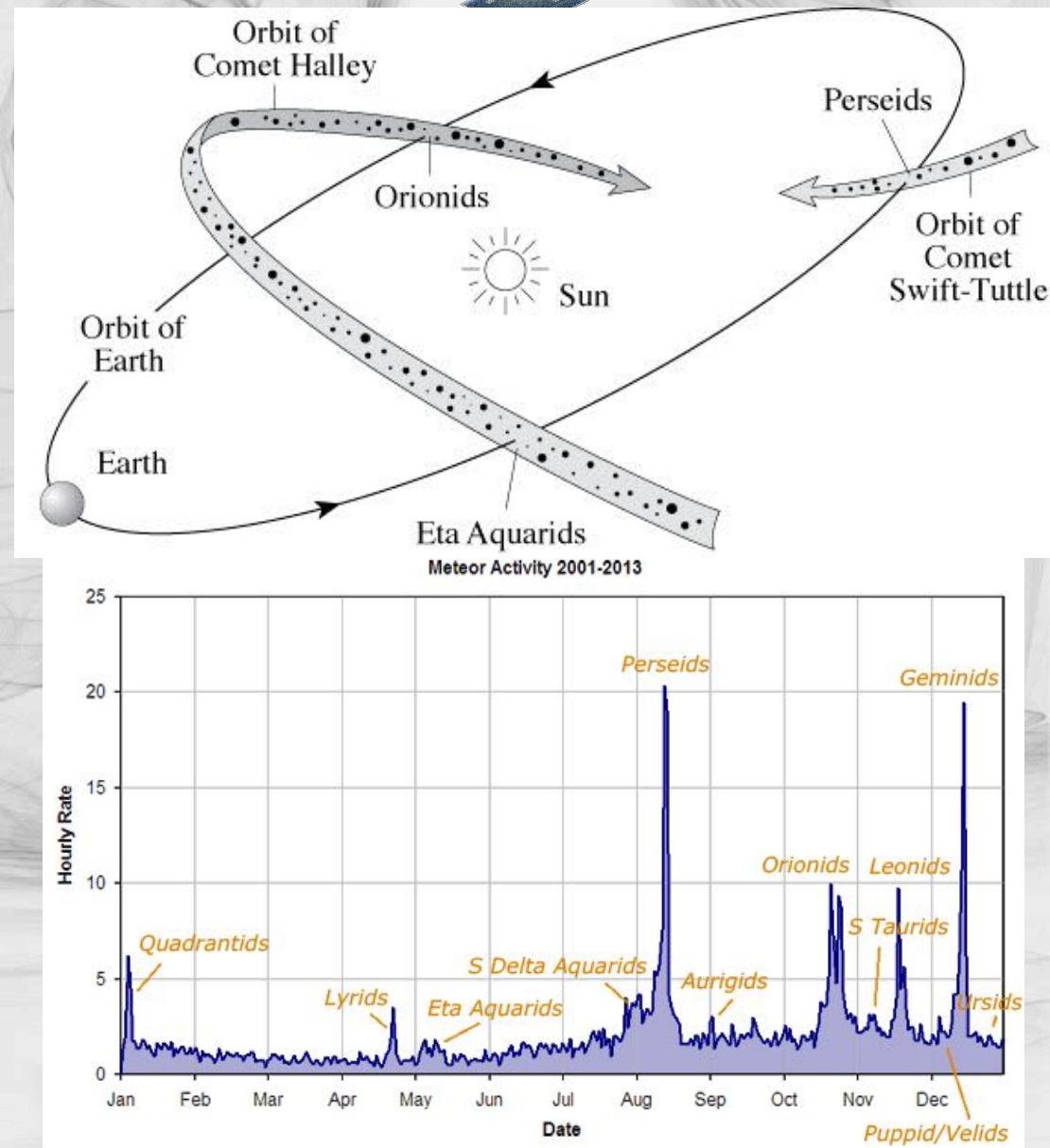
Débris et micro-météorites

- ❖ Impacts à grande vitesse
 - ❖ Impact d'un projectile plastique de 6,4 g à une vitesse de 7,8 km/s dans un bloc d'aluminium de 11 kg.



Débris et micro-météorites

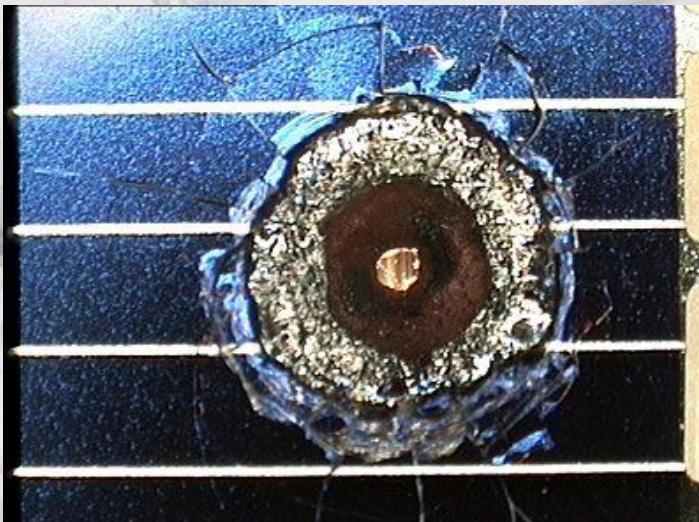
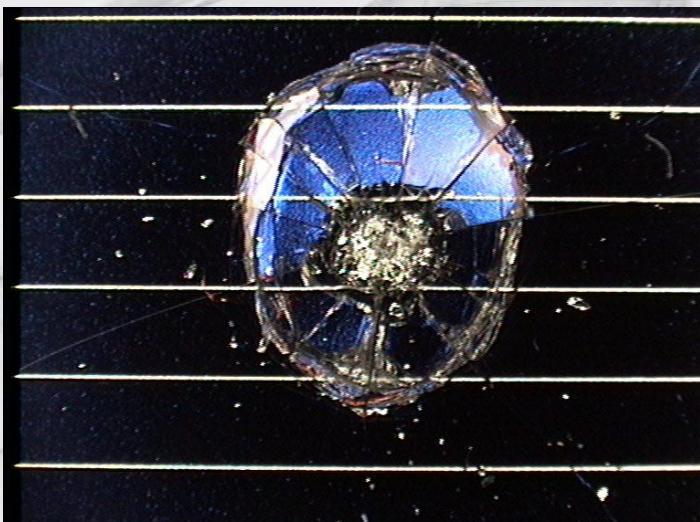
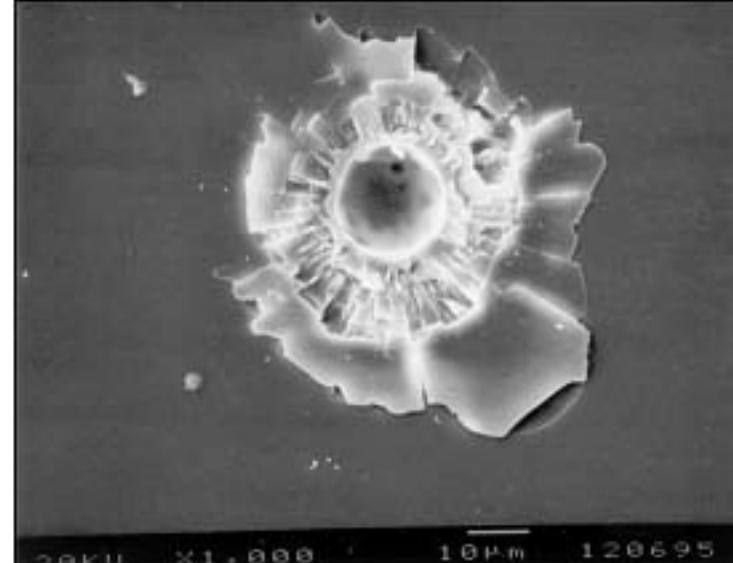
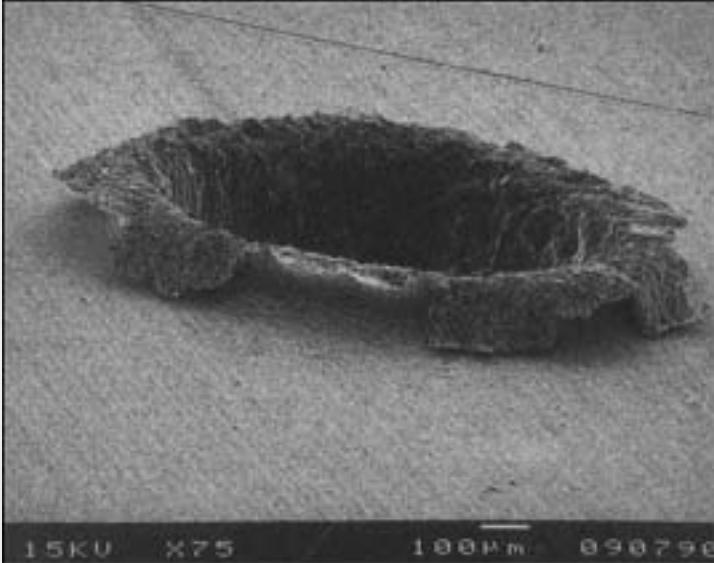
- ❖ La Terre traverse régulièrement des essaims de météorites laissées par le passage de comètes



Débris et micro-météorites



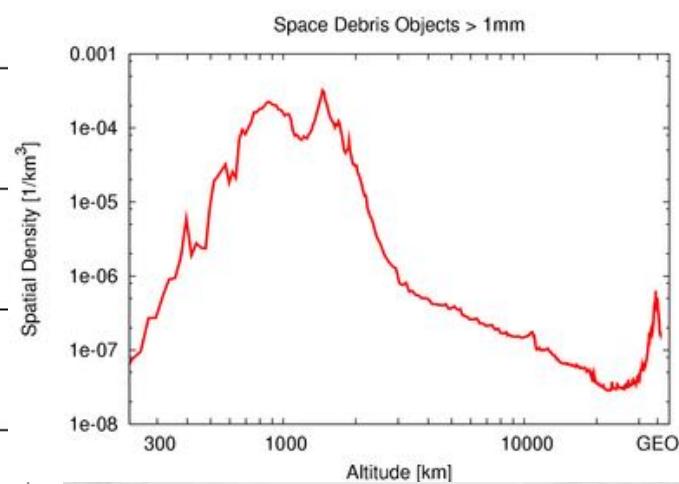
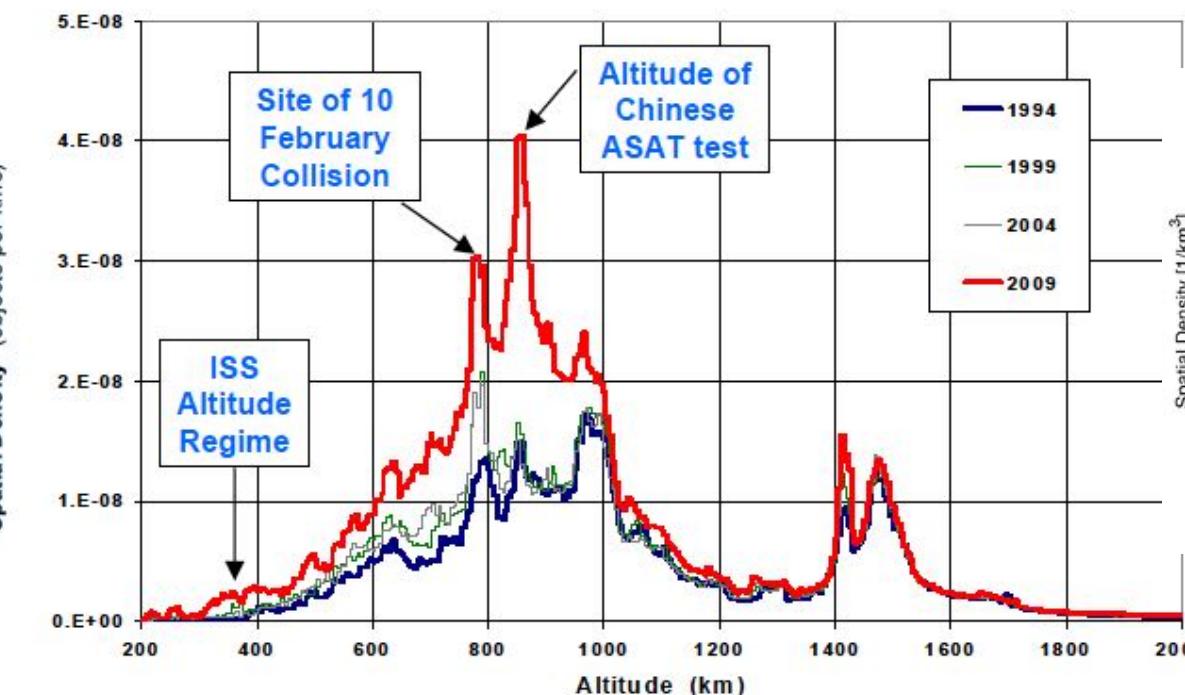
❖ Photographies d'impacts



Débris et micro-météorites



- ❖ Les activités spatiales ont laissé beaucoup d'objets de tailles diverses dans l'espace
 - ❖ Des satellites hors services (le plus ancien est Vanguard 1, lancé en MEO en 1958 ...)
 - ❖ Des équipements perdus par des vols habités (gant, outils divers, caméras, ...)
 - ❖ Etages supérieurs de fusées
 - ❖ Restes de carburants (cristaux glacés)
 - ❖ Des explosions en orbites : accidentelles ou volontaires (essais militaires anti-satellites), plusieurs milliers de débris à chaque fois

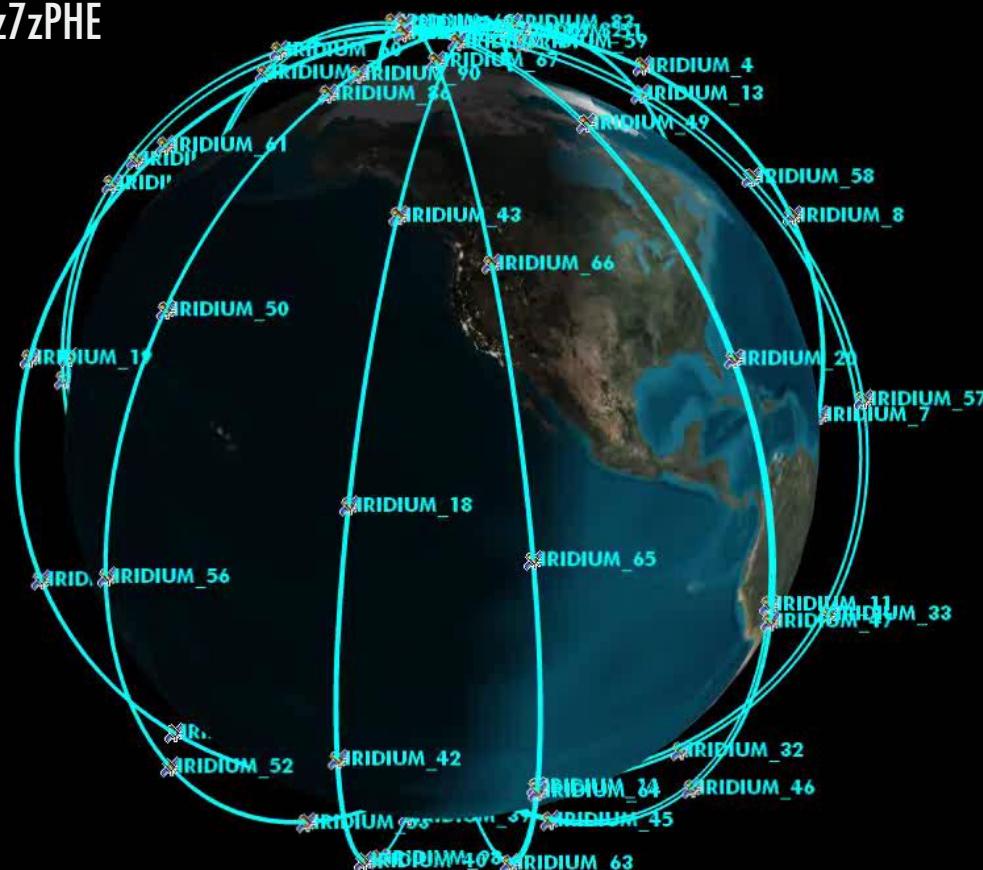


Débris et micro-météorites



- ❖ Simulation de la collision entre un satellite Iridium et un satellite désactivé russe en 2009 : des milliers de débris sur une orbite très peuplée (800 km)

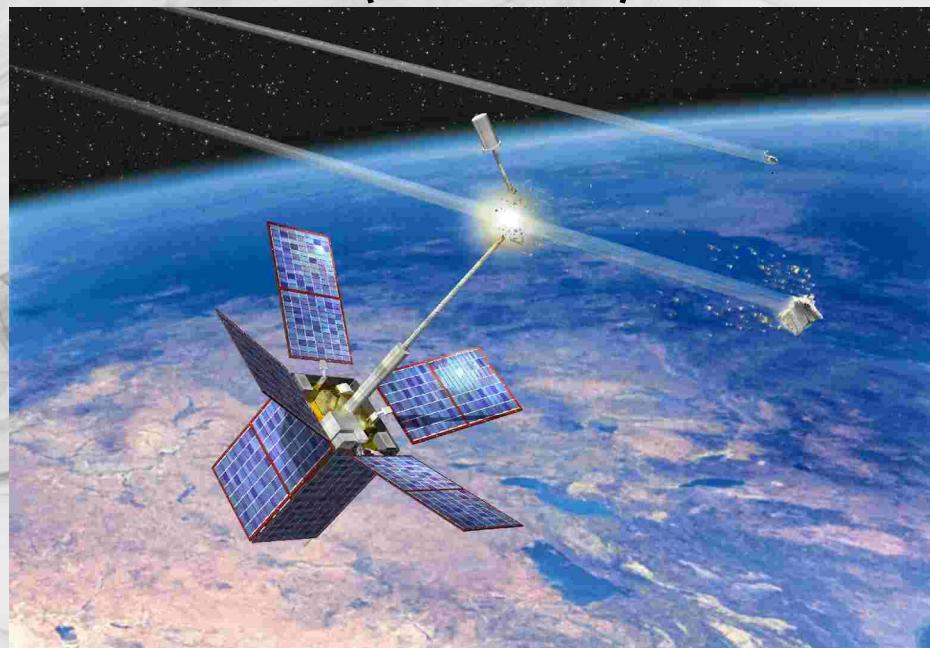
<https://youtu.be/FGYDlz7zPHE>



Débris et micro-météorites



- ❖ 4 cas recensés de pertes de satellites suite à des débris
 - ❖ 24 juillet 1996 : satellite militaire français Cerise : impact avec un étage d'Ariane lancé en 1986
 - ❖ 17 janvier 2005 : collision entre un étage lanceur américain (Thor) et un débris de lanceur chinois (CZ-4)
 - ❖ décembre 1991 (collision identifiée en 2005) : collision entre satellite de navigation russe (COSMOS 1991) et un débris de satellite russe (COSMOS 926)
 - ❖ février 2009 : la dernière collision en date a impliqué deux satellites, dont un actif (IRIDIUM 33), et un satellite russe inactif mais intact (COSMOS 2251).

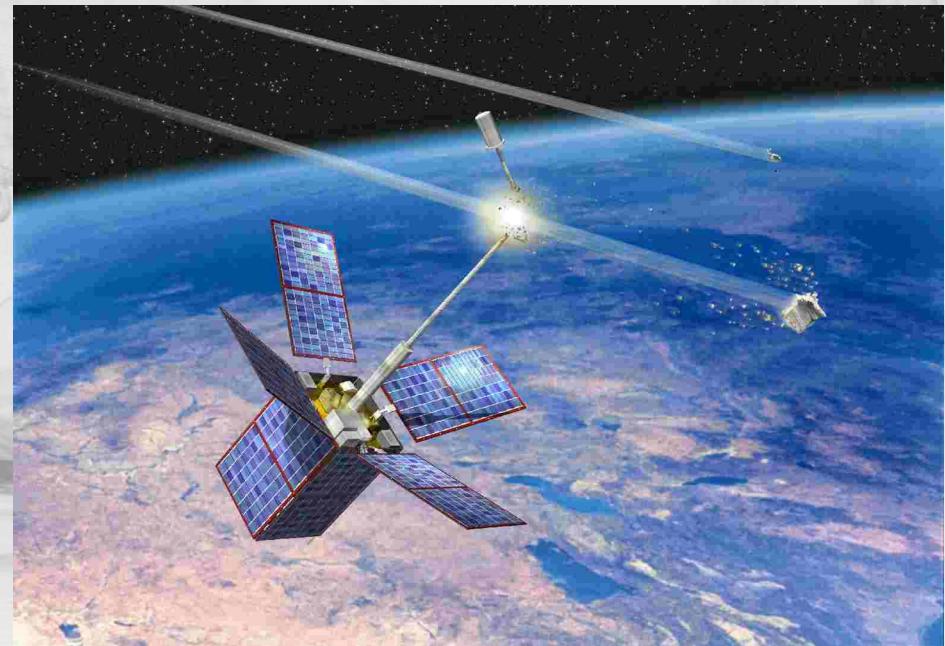


Débris et micro-météorites



❖ Mesures de prévention

- ❖ Suivi au sol (télescopes et radars) des débris en orbite : pratiquement tous les débris >10 cm, débris < 1 cm trop petits ...
- ❖ Collectes en vol pour études
- ❖ Loi sur les Opérations Spatiales (initiative dans le Monde, obligatoire en Europe) :
 - ❖ Passivation des lanceurs et satellites en fin de vie : évacuation des restes de carburant et décharge des batteries (pas de risque d'explosion)
 - ❖ En LEO : retour naturel en moins de 25 ans
 - ❖ En GEO : orbite 'poubelle' 350 km au-dessus
- ❖ Quelques projets (crédibles ?) pour retrier in situ ou depuis le sol (lasers) ces débris

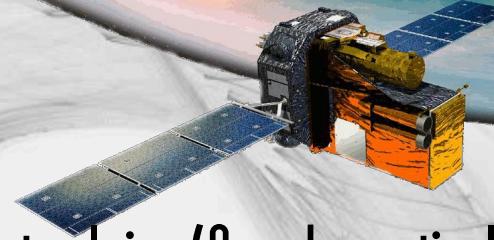


Débris et micro-météorites

<https://youtu.be/qTAv7TsnjzA>



Magnétosphère

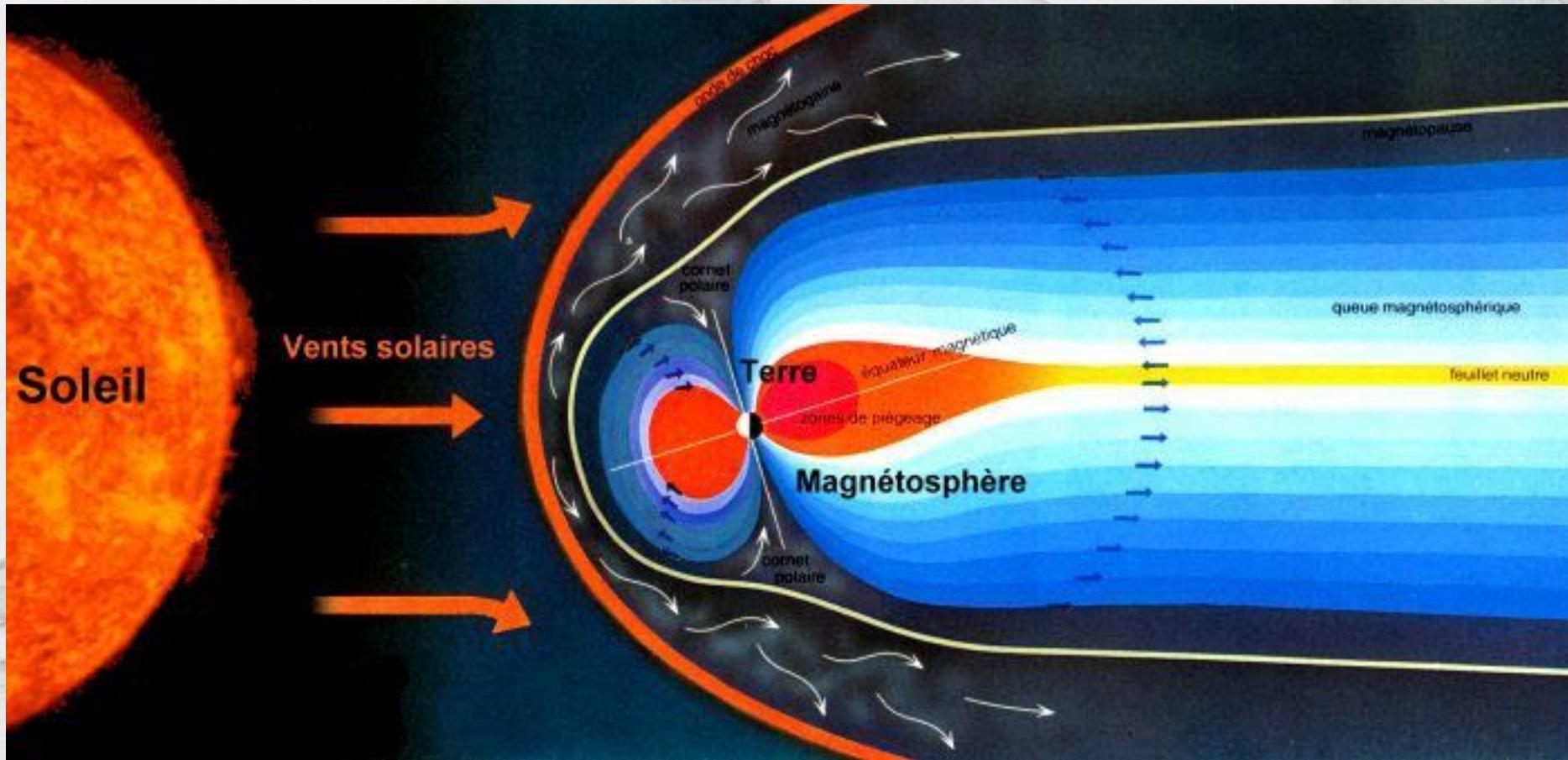


- ❖ La magnétosphère est définie par l'interaction entre le vent solaire (**flux de particules chargées**) et le champ magnétique terrestre. Elle forme une cavité naturelle au sein du milieu interplanétaire, protégeant partiellement la Terre des rayonnements extérieurs
- ❖ La source interne du geomagnétisme (**quasiment dipolaire**) est dû aux mouvements de convection du noyau métallique (**effet dynamo**)
 - ❖ L'axe du dipôle est incliné de 11° / axes de rotation et décalé de 500 km vers le Pacifique Ouest
 - ❖ Le champ est donc plus faible au niveau du Brésil => Anomalie de l'Atlantique Sud (SAA)
- ❖ Le champ magnétique est quasiment dipolaire jusqu'à 4-5 rayons terrestres (**symétrie de révolution**), puis subi l'effet du vent solaire
 - ❖ Compression côté jour, soufflage côté nuit
- ❖ La convergence des lignes de champ au niveau des pôles (**cornets polaires**) offre une possibilité de pénétration pour les particules externes.
- ❖ La cavité magnétosphérique est dynamique : sa forme dépend de l'intensité du vent solaire, du champ magnétique interplanétaire, des fluctuations séculaires du géomagnétisme

Magnétosphère



❖ Interaction du vent solaire avec la magnétosphère



Les ceintures de radiations

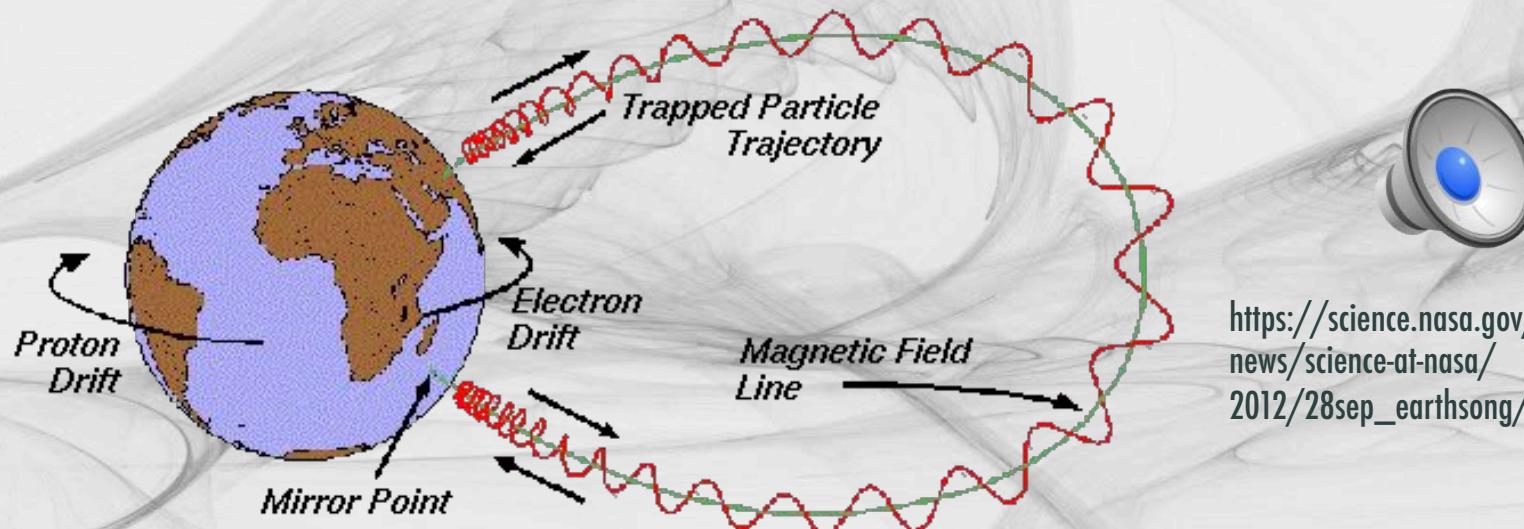


- ❖ Le champ magnétique terrestre peut piéger des particules chargées (essentiellement protons et électrons) pendant un temps relativement long
- ❖ Mécanisme :
 - ❖ Une particule chargée tourne autour des lignes de champ magnétique en raison de la force de Lorentz : $\mathbf{F} = q (\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}) = q (v_{\perp} \wedge \mathbf{B})$
 - ❖ Le moment magnétique est conservé ($\frac{1}{2} m v_{\perp}^2 / B$) => v_{\perp} augmente au niveau des pôles (augmentation de B)
 - ❖ L'énergie cinétique ($\frac{1}{2} m (v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2)$) est conservée => v_{\parallel} s'annule et change de signe => existence de points miroir et 'rebonds' des particules
- ❖ Le gradient de champ magnétique entraîne les électrons vers l'est et les protons vers l'ouest.
- ❖ Il existe 2 principales ceintures de radiation (ou ceintures de Van Allen)
 - ❖ Externe : peuplé d'électrons injectés via la queue magnétosphérique
 - ❖ Interne : peuplé d'électrons et protons, issus de la désintégration des neutrons (réactions nucléaires dans les cornets polaires et directement du vent solaire)

Ceintures de radiation

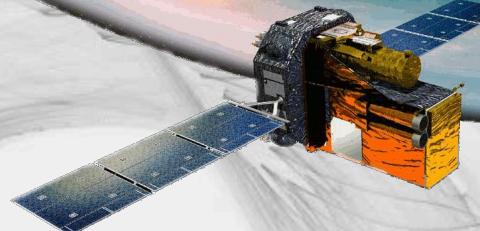


Type de particule	Energie	Altitude	Rayon de giration	Période de giration	Période de rebond	Période de dérive
Proton	10 MeV	$1,5 R_T$	45 km	7 ms	65 s	3 min
Proton	10 MeV	$4 R_T$	880 km	130 ms	1,7 s	1,1 min
Electron	1 MeV	$1,5 R_T$	500 m	10 us	0,1 s	10 min
Electron	1 MeV	$4 R_T$	10 km	0,2 ms	0,3 s	3,5 min



https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2012/28sep_earthsong/

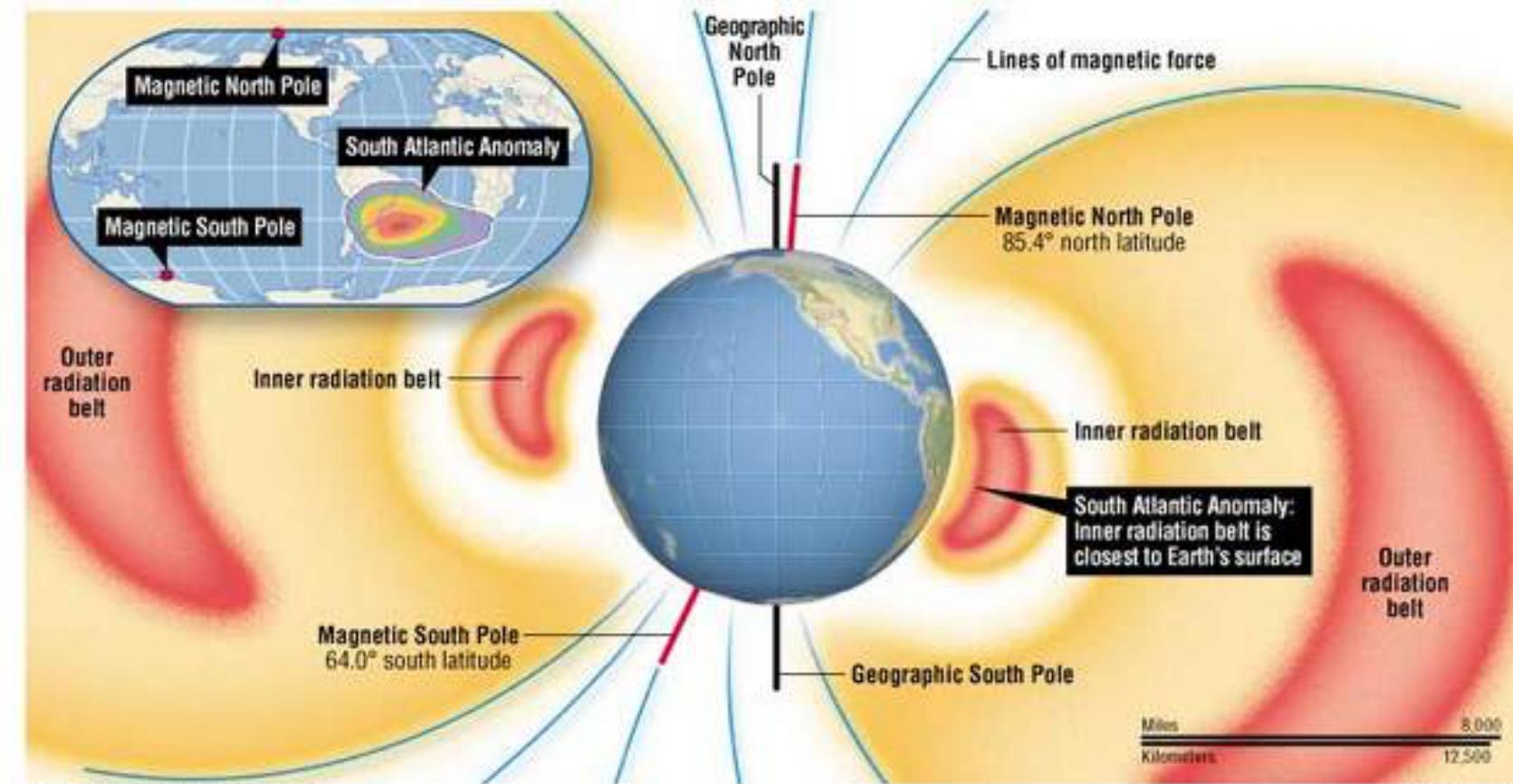
Ceintures de radiation



❖ Dipôle et ceintures de radiations

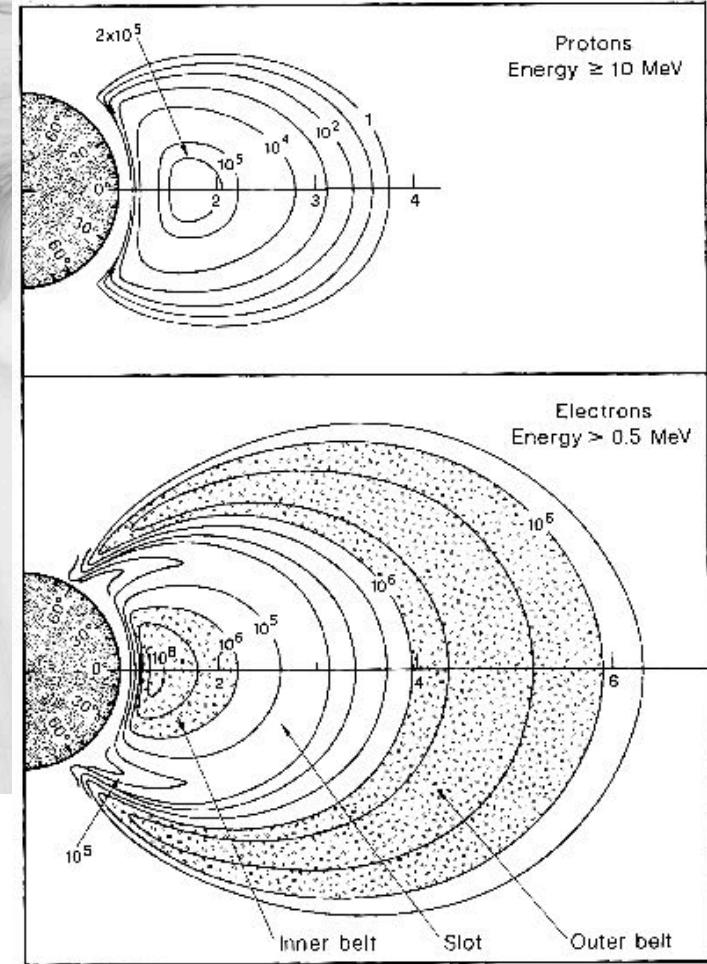
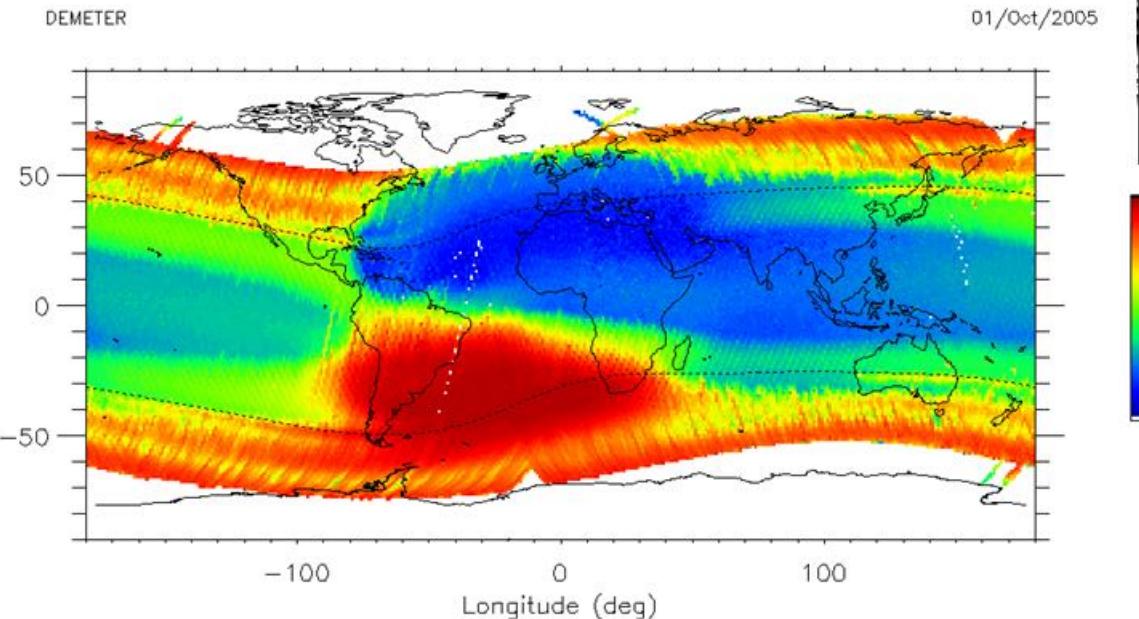
DANGER ZONE

The South Atlantic Anomaly is a region where the inner Van Allen radiation belt reaches down to about 200 kilometers above the Earth's surface, posing a danger to spacecraft in low Earth orbits. Centered off the coast of Brazil, the anomaly is thought to be the result of the offset between the planet's geographic and magnetic poles.

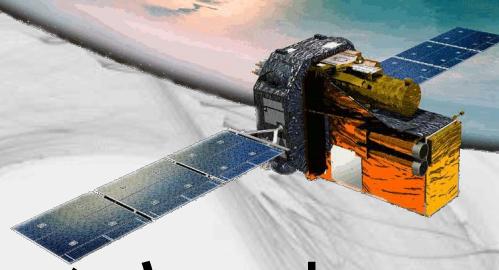


Ceintures de radiation

- ❖ Etendue des ceintures de radiation
- ❖ Flux d 'électrons de 200 keV à 650 km d'altitude (satellite DEMETER, 2005)
 - ❖ Ces particules affectent les satellites en orbite polaire (fréquents ..) et toutes les orbites dans les zones 600 – 6400 km (ceinture interne) et 22 000 – 32 000 km (ceinture externe)



Vent solaire



- ❖ Le vent solaire est un plasma (particules chargées) peu dense issu de la couronne solaire (dont la température cinétique est porté à 2 millions de degrés)
- ❖ Le vent solaire entraîne le champ magnétique avec lui et les lignes de champ interplanétaire s'enroulent comme une spirale d'Archimède
- ❖ Le feuillet neutre fluctue et la Terre passe alternativement dans des zones d'orientation magnétique opposées
- ❖ Composition du vent solaire :
 - ❖ Protons et électrons de faibles énergie + 7 à 8 % de noyaux d' He
 - ❖ La composition et l'intensité est très variable en fonction de l'activité solaire

Vent solaire

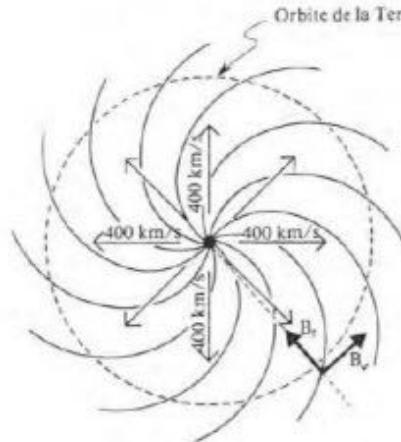
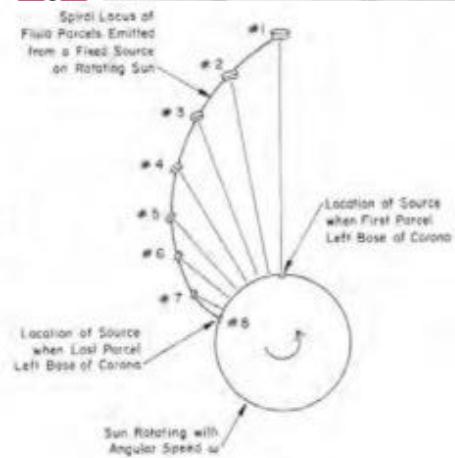
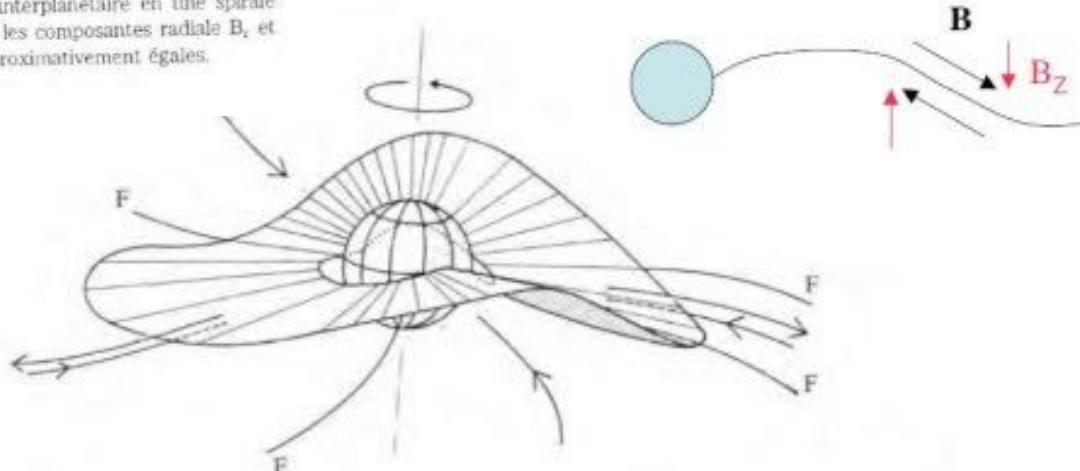
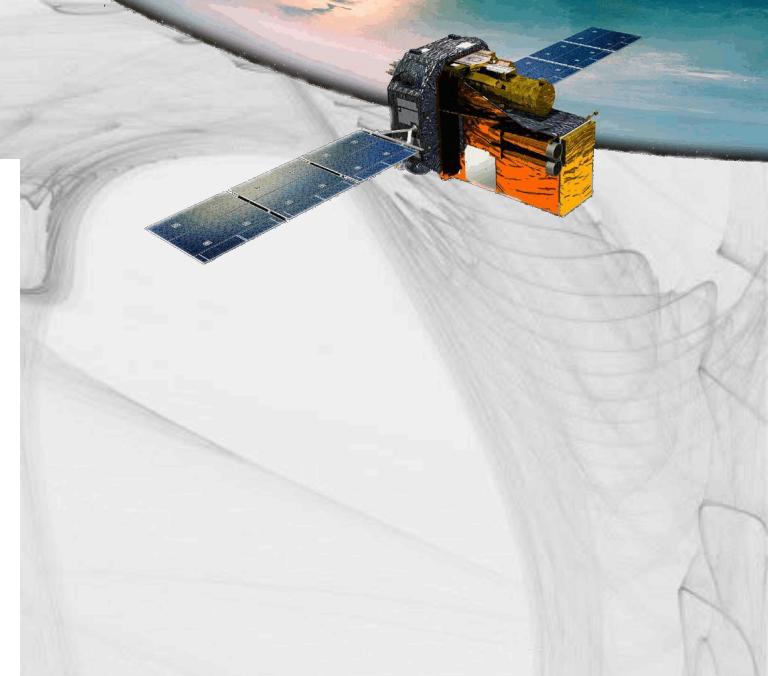


FIG. 5-4 – L'expansion coronale à une vitesse uniforme $|\vec{V}|$, combinée avec la rotation solaire, enroule les lignes de force du champ magnétique interplanétaire en une spirale d'Archimède. Il en résulte qu'au niveau de l'orbite terrestre les composantes radiale B_r et azimuthale B_θ du champ magnétique interplanétaire sont approximativement égales.

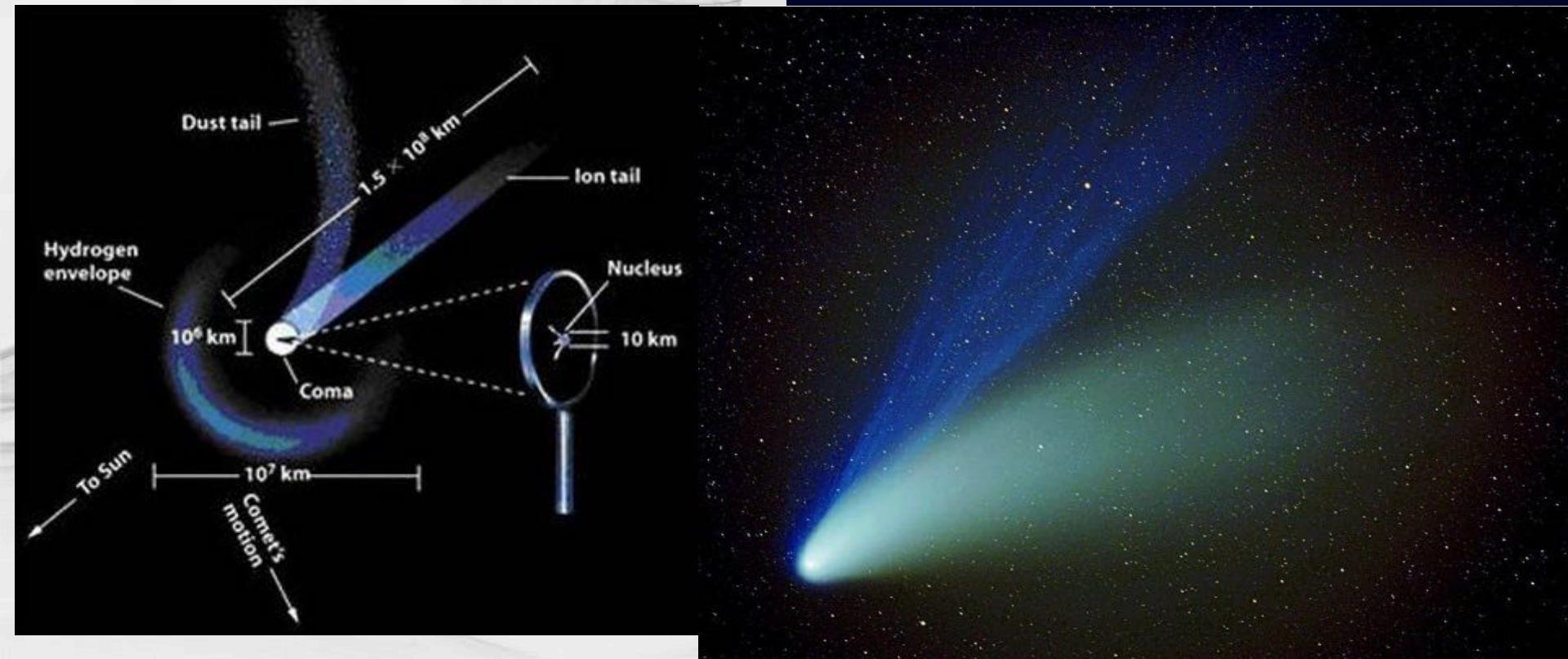
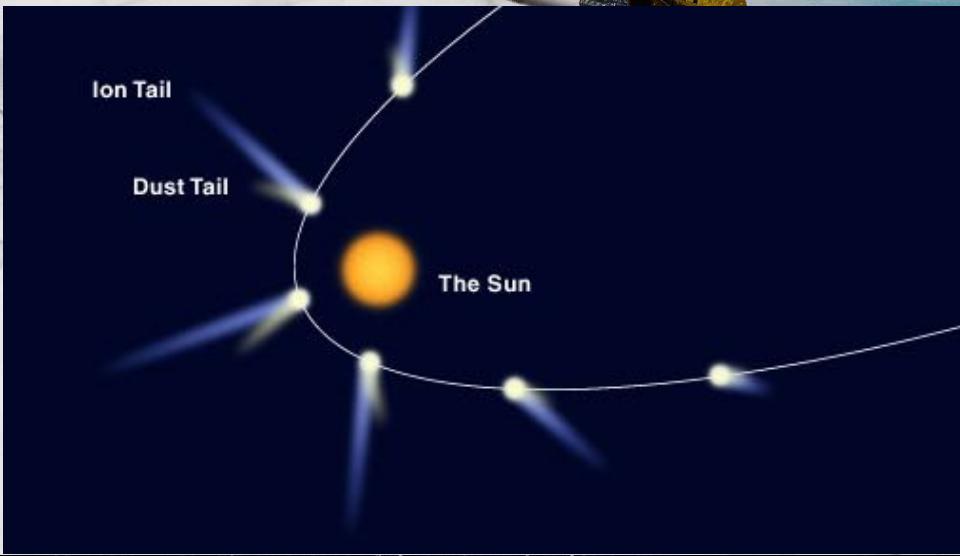


❖ Structure en 'jupe de ballerine'

FIG. 5-6 – L'héliosphère apparaît à grande échelle comme divisée en deux hémisphères de polarités magnétiques opposées, l'un fait de lignes de force orientées vers le Soleil (« toward hemisphere »), l'autre de lignes de force orientées dans la direction antisolaire (« away hemisphere »), séparés par une couche neutre dont la position oscille autour de l'équateur solaire. Ces oscillations sont à l'origine de la séparation apparente du nûage interplanétaire en secteurs magnétiques de polarités opposées lorsqu'il est vu en coupe dans le plan de l'écliptique. (D'après J. L. Steinberg, *Le Vent solaire*, Actes du colloque « Technologie de l'environnement spatial », Éditions du CNES, 1986. Avec l'aimable autorisation du CNES.)

Vent solaire

- ❖ Les comètes ont 2 queues : gravitationnelle (poussières) et magnétique (ions)

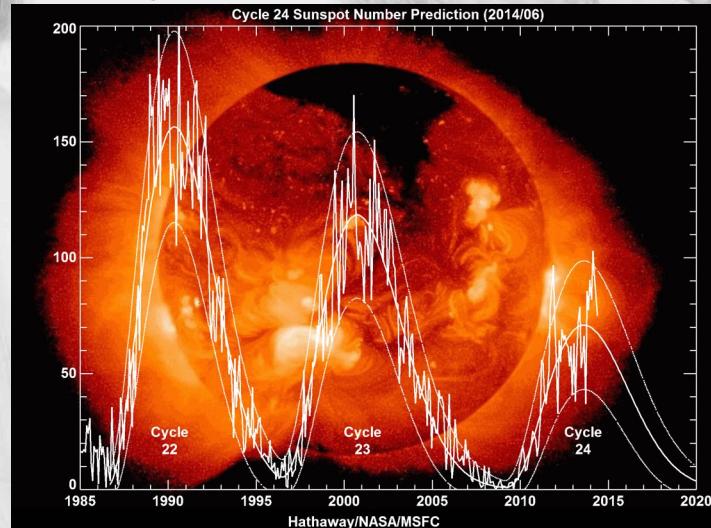


Activité solaire et éruptions

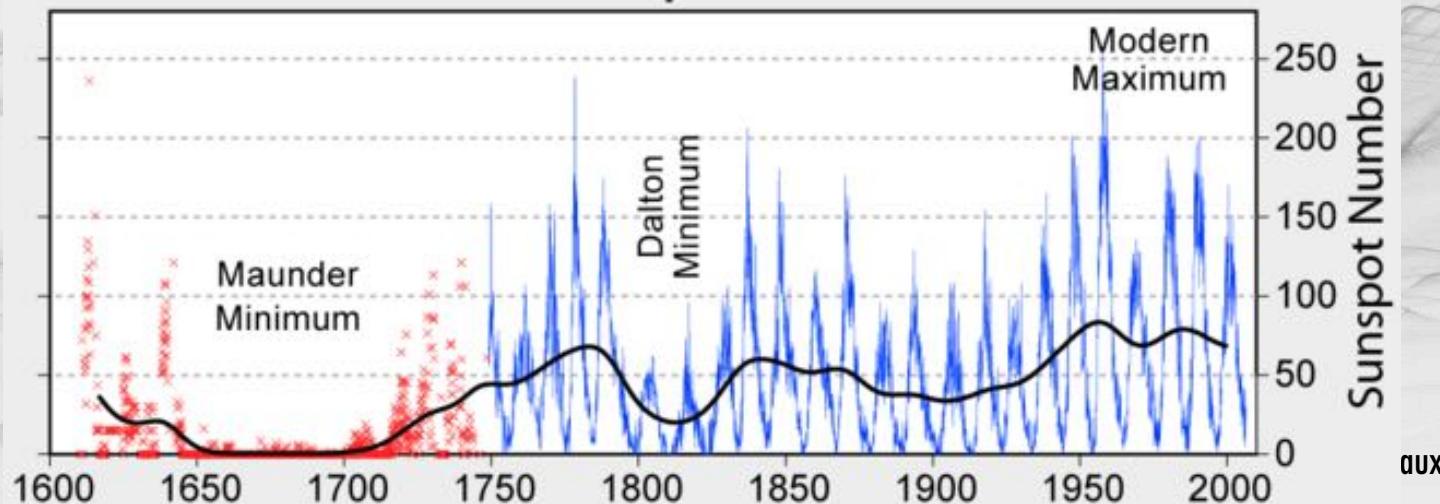
Le Soleil connaît un cycle d'activité avec une période d'environ 11 ans



- ❖ Variations négligeable dans le visible
- ❖ Très fortes variations dans les UV et les particules chargées émises
- ❖ Observé depuis le 18^{ème} siècle en comptant les tâches solaires (reflet de l'activité magnétique à la surface du soleil)
- ❖ Affecte la population de particules piégées dans les ceintures, ionise la haute atmosphère, bloque plus ou moins le rayonnement cosmique
- ❖ Les éruptions solaires sont plus probables pendant les maxima d'activité
- ❖ Une reconnexion des lignes de champ magnétique au niveau d'une tâche solaire peut provoquer un réchauffement extrême (100 millions de degrés dans la couronne) et l'éjection de particules chargées et de photons (des radio aux gammas)
- ❖ Les plus violentes éruptions peuvent provoquer une éjection de masse coronale



400 Years of Sunspot Observations



Eruptions solaires



- ❖ Les éruptions solaires déforment la magnétosphère et injectent des particules chargées dans les ceintures de radiations et les cornets polaires
 - ❖ 2 classes d'éruptions solaires : protons et ions lourds
- ❖ Potentiellement dangereux pour les composants électroniques
 - ❖ Satellites géostationnaires : compression de la magnétosphère côté jour et exposition directe au vent solaire
 - ❖ Satellites en orbites basses : flux de protons plus importants lors du passage dans les cornets polaires et la SAA
 - ❖ Perturbations des réseaux électriques terrestres
 - ❖ Aussi responsables de très jolies aurores boréales ...
- ❖ Deux grandes éruptions historiques :
 - ❖ 01 & 02/09 1859 :
 - ❖ perturbations magnétiques très fortes (mesures par des magnétomètres), aurores boréales visibles jusqu'aux Caraïbes et à Hawaï ... Fait suite à l'observation de nombreuses tâches solaires 4 jours plus tôt.
 - ❖ a affecté les réseaux de télégraphie (court-circuits, électrocutions, incendies, ...)
 - ❖ La plus forte éruption solaire enregistrée (occurrence moyenne estimée tous les 150 ans). Les conséquences se chiffraient en centaines de milliards d'euros aujourd'hui ...
 - ❖ 13/03 1989 : fait suite à une éjection de masse coronale du 09/03, perturbations des réseaux radios (crainte d'un brouillage soviétique !), nombreux dysfonctionnements de satellites, coupure électrique au Québec



- ❖ En juillet 2012, une éruption comparable à celle de 1859 a eu lieu mais l'éjection coronale a juste raté la Terre

<https://www.youtube.com/watch?v=7ukQhyckOFw>

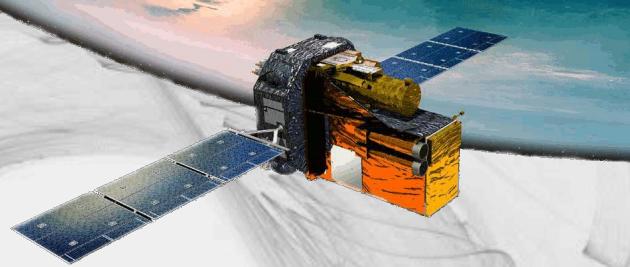
Eruptions solaires



- ❖ Eruptions solaires vues par les satellites SOHO et STEREO

<https://youtu.be/4wjKAGR4xKA>

Rayonnement cosmique



- ❖ Le rayonnement cosmique constitue un fond continu d'ions d'énergies très élevées, provenant de sources galactiques et extragalactiques
 - ❖ Découvert par V. Hess en 1912 (expériences ballon)
 - ❖ Les énergies par particule vont de 1 GeV à 10^{20} eV (soit plus de 10 Joules : énergie cinétique d'une balle de ping-pong à 300 km/h ...)
 - ❖ Le flux est isotrope (déviation des particules par les champs magnétiques galactique et solaire)
- ❖ La magnétosphère filtre efficacement le rayonnement cosmique en orbites basses et moyennes (sauf aux pôles)
 - ❖ Les satellites géostationnaires et HEO peuvent être perturbés par l'effet des ions lourds
 - ❖ Le rayonnement cosmique est plus faible en période d'intense activité solaire (blindage magnétique de l'héliosphère renforcée)

Effets radiatifs

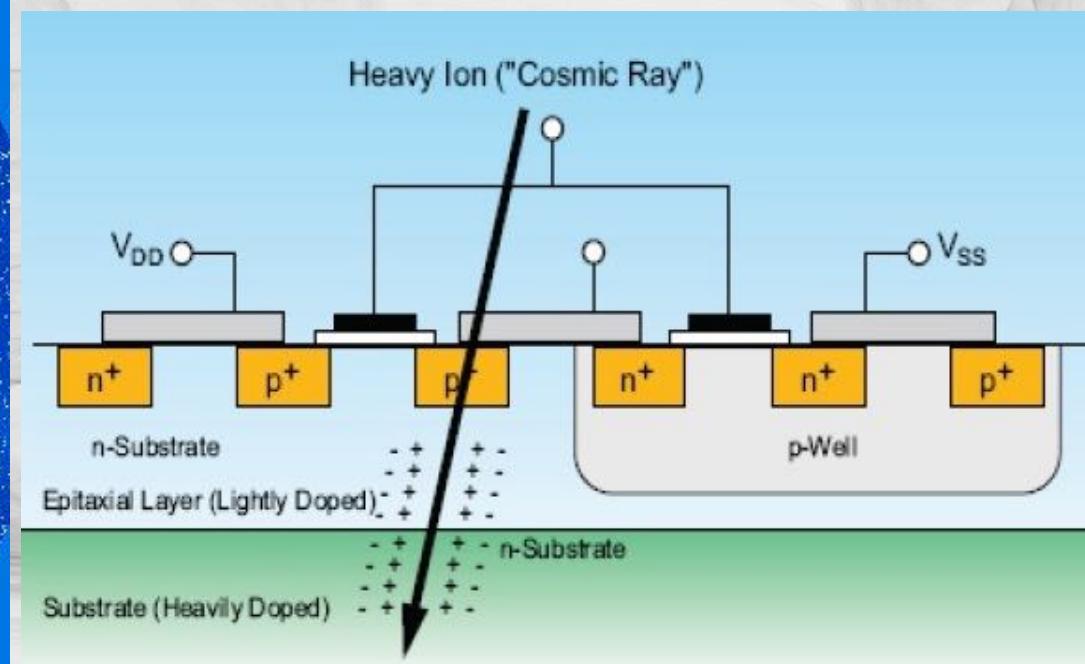
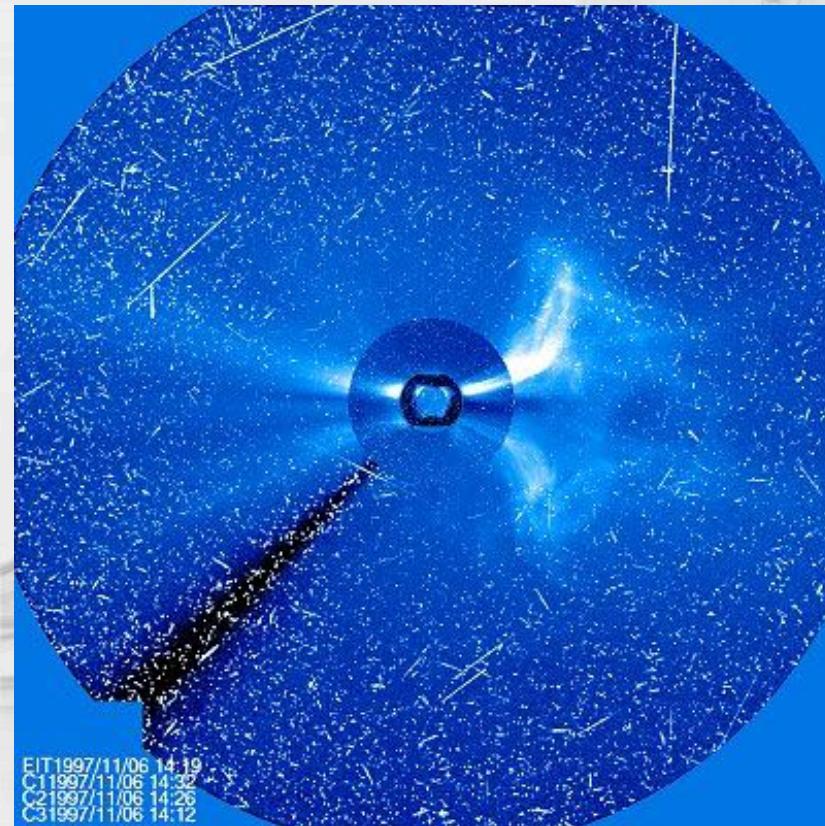


- ❖ Notion de dose = densité d'énergie absorbée
- ❖ Effets possibles d'une collision rayonnement – matière
 - ❖ Ralentissement, diffusion, absorption : effet photo-électrique, ionisation, diffusion Compton, etc.
 - ❖ Formation de défauts ponctuels : déplacement d'atomes, modification de la composition chimique
 - ❖ Création de rayonnements secondaires : réactions nucléaires, éjection d'électrons, création de paires particules - antiparticules, etc.
- ❖ Effets sur les matériaux (effets de dose, cumulatif) :
 - ❖ Dégradations de propriétés optiques (points noirs dans les fibres par exemple), électriques, mécaniques
 - ❖ Bruits de fond dans les détecteurs
 - ❖ Claquages dus à l'accumulation de charges électrostatiques
 - ❖ Modification du dopage des semi-conducteur : disfonctionnement des transistors, courants de fuite, etc.
- ❖ Evènements singuliers
 - ❖ Les ions créent un canal ionisé sur leur passage qui peut provoquer un court-circuit dans un composant électronique (transistor en particulier)
 - ❖ Peut changer l'état logique d'une mémoire (passages de bits de 0 à 1 ou vice versa) : bug informatique ...
 - ❖ Latchup : court-circuit entre l'alimentation et le substrat du transistor => risque de destruction du composant

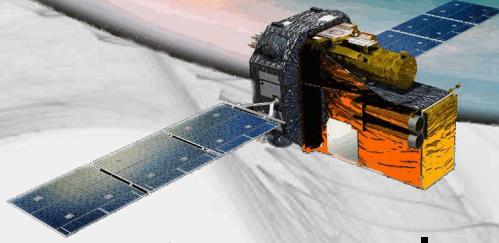
Effets radiatifs



- ❖ Single events
- ❖ Traces des protons sur la camera de SOHO (après une éruption solaire)



Effets radiatifs



- ❖ Traces des protons sur la camera de SOHO (après une éruption solaire)

<https://youtu.be/4wjKAGR4xKA>

Techniques de protection contre les radiations



- ❖ 1^{ère} étape : simulation du rayonnement reçu par le satellite
 - ❖ Dépend de l'orbite, de l'activité solaire probable, de l'architecture mécanique, etc
 - ❖ Simulations de Monte-Carlo : on lance des particules suivant un spectre donné et on suit leurs différentes interactions jusqu'au niveau du composant
- ❖ Contre les effets de dose
 - ❖ Sélection de technologies 'robustes' : tests en accélérateurs, expérience de missions antérieures, utilisation de composants 'durcis' (spécifiquement conçus pour résister aux rayonnements ionisants)
 - ❖ Redondance froide ou arrêt de sous-systèmes dans les zones actives (pôles, SAA) : certains effets sont aggravés par la mise sous tension des composants (migration des porteurs par exemple)
 - ❖ Blindage des composants sensible (aluminium contre les électrons, matériau dense contre les protons)
 - ❖ Prise en compte de la dégradation des composants en fin de vie (efficacité des panneaux solaires par exemple)
- ❖ Contre les événements singuliers :
 - ❖ Faible volume sensible, technologies adéquates (pas de possibilité de court-circuit)
 - ❖ Limiteurs de courant, coupure automatique d'alimentation en cas de pic de courant
 - ❖ Codes détecteurs d'erreurs pour les mémoires embarquées, vote majoritaire (stockage multiple de l'information)
- ❖ L'impact des ions va aussi charger progressivement le satellite
 - ❖ Il faut éviter les différences de potentiel dans le satellite (risque de claquage et destruction de composants électroniques)